



**Linete de Ceita Lima Afonso**  
Licenciada

# **Estudo Numérico do Galgamento de Estruturas de Protecção Costeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas

Orientador: Dr. Corneliu Cismasiu

Júri:

Presidente: Dr. João Gouveia Bento Leal  
Arguente: Dr<sup>a</sup>. Maria da Graça Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro de 2011**



“Copyright” Linete de Ceita Lima Afonso, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A vida acadêmica é apenas uma das etapas importantes na vida de um indivíduo uma vez que ao longo da vida encaramos muitas outras etapas e cruzamos com pessoas que contribuem para o abrir da nossa mente a novas ideias. Gostaria de agradecer sinceramente todas essas pessoas, ou seja, amigos, colegas, professores, etc.

Ao orientador desta dissertação, o Prof. Doutor Corneliu Cismasiu, agradeço a oportunidade concedida para a sua realização, e toda a disponibilidade e paciência manifestada na supervisão dos trabalhos. O agradecimento é extensivo a Professora Maria da Graça Neves e o Prof. Doutor Eric Didier que contribuíram com as suas críticas e sugestões.

E porque os últimos são os primeiros, um especial agradecimento à minha fantástica família, e ao Celso - Muito obrigado pelo vosso apoio!

*Everything should be made as simple  
as possible...*  
(Albert Einstein)



# Resumo

O aprofundamento dos conhecimentos relativos ao fenómeno de galgamentos de estruturas de protecção costeira tem vindo a revelar-se importante. Esta importância tem que ver com a necessidade de proteger bens e pessoas, que actualmente, ocupam densamente as zonas costeiras.

A interacção entre ondas e estruturas é um fenómeno complexo, dada a grande diversidade de parâmetros e fenómenos em causa. Entre outros, a cota do coroamento, a geometria do perfil transversal e a agitação marítima caracterizada pelas ondas de vento aparecem como factores decisivos no projecto das estruturas de protecção longitudinal aderente impermeável. Na fase inicial do projecto da estrutura recorre-se a métodos empíricos e semi-empírico e, para reduzir o grau de incerteza, recorre-se a modelação física na fase final do projecto.

Com o avanço da tecnologia computacional, tem sido possível simular numericamente cenários de escoamento de fluidos, como é o caso do fenómeno de galgamento. Esta possibilidade apresenta enormes vantagens no que toca à redução de tempo e custos na fase de projecto e na optimização dos modelos físicos. No entanto, a modelação numérica ainda é tida como ferramenta complementar do modelo físico dado que os seus resultados ainda não são seguros.

Neste contexto, o presente trabalho tem como foco a aplicação do programa de cálculo *SPHysics* como ferramenta para simular o galgamento resultante da interacção onda-estrutura. Para tal, é estudado o modelo numérico com um cenário de praia com estrutura de protecção marginal para a qual existem dados experimentais resultantes de ensaios efectuados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

O modelo numérico, para o caso estudado, representa adequadamente as séries temporais de elevação da superfície livre no modelo físico. Quanto ao cálculo do caudal médio galgado, o modelo numérico aproximou-se do modelo experimental o que permitiu simular uma proposta diferente da estrutura de modo a possibilitar a redução da cota de coroamento da mesma.

**Palavras chave:** Estrutura de protecção costeira, galgamento, método das partículas, modelação numérica, *SPHysics*.





# Abstract

The deepening of knowledge about the phenomenon of overtopping of coastal protection structures has becoming important. This importance has to do with the need to protect assets and people that currently fill densely the coastal areas.

In fact, the interaction between waves and structures is a complex phenomenon, given the great diversity of parameters and phenomena in question. Among other, the crest freeboard, the cross-section geometry and maritime agitation appear as decisive factors in the design of protective marginal impermeable structures. Generally, the initial design of such infrastructure would resort to empirical and semi-empirical, and to reduce the uncertainty of specific cases, resort to physical modeling in the final phase of the project.

With the advancement of computer technology, it has been possible to numerically simulate fluid flow scenarios, such as the phenomenon of wave overtopping. This possibility has enormous advantages when it comes to reducing time and costs during the phase of design and optimization of the physical models. However, numerical modeling is still seen as a complementary tool of the physical model because their results are not yet safe.

In this context, the present work has as focus the application of the SPHysics computing program to simulate the overtopping resulting from the wave-structure interaction. A beach with marginal protective structure - for which there are experimental data from tests performed by the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC) - is taken as the study scenario.

The numerical SPHysics model for the 'case study' represent adequately the time series of the free surface elevation obtained in the physical model. Concerning to calculating the average of the flow climbed, the numerical model approached the experimental model allowing to simulate a different proposal of the structure to enable the reduction of the crest freeboard.

**Keywords::** Coastal protection structures, wave overtopping, numerical models, smoothed-particle hydrodynamics, SPHysics.



# Índice de Matérias

<b>Copyright</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento geral . . . . .	1
1.2 Objectivos e contribuições . . . . .	6
1.3 Organização da dissertação . . . . .	7
<b>2 Fenómeno de galgamento</b>	<b>9</b>
2.1 Considerações gerais . . . . .	9
2.2 Parâmetros e fenómenos condicionantes . . . . .	11
2.2.1 Agitação marítima . . . . .	11
2.2.2 Parâmetros geométricos e estruturais . . . . .	15
<b>3 Método das partículas</b>	<b>17</b>
3.1 Considerações gerais . . . . .	17
3.2 Método das partículas (SPH) . . . . .	21
3.2.1 Método de aproximação das partículas . . . . .	22
3.2.2 Comportamento do fluido . . . . .	25
3.2.3 Aproximação discreta da densidade da partícula . . . . .	26
3.2.4 Aproximação discreta da quantidade de movimento . . . . .	26
3.2.5 Aproximação discreta da energia interna . . . . .	28
<b>4 Modelo físico</b>	<b>29</b>
4.1 Características do modelo físico . . . . .	29
4.2 Resultados do modelo físico . . . . .	31

<b>5</b>	<b>Simulação no SPHysics</b>	<b>37</b>
5.1	SPHysics . . . . .	37
5.2	Características do código . . . . .	37
5.3	Descrição do modelo numérico . . . . .	38
5.4	Resultados do modelo numérico . . . . .	41
5.5	Análise e discussão dos resultados . . . . .	45
5.6	Exemplo da versatilidade SPHysics . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>53</b>
6.1	Conclusões principais . . . . .	53
6.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	55
	<b>Bibliografia</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Secção transversal do modelo físico.</b>	<b>61</b>
<b>B</b>	<b>Ficheiro de dados do modelo numérico</b>	<b>63</b>
<b>C</b>	<b>Código POST-SPH.f</b>	<b>65</b>
<b>D</b>	<b>Gráficos</b>	<b>67</b>
<b>E</b>	<b>Implementação do perfil côncavo</b>	<b>71</b>

# Índice de Figuras

1.1	Problemas existentes nas frentes urbanas próximas da linha costeira.	1
1.2	Exemplos de soluções de defesa costeira.	2
1.3	Perfis de estruturas longitudinais aderentes impermeáveis.	4
2.1	Galgamento numa estrutura de protecção longitudinal aderente.	9
2.2	Perfil longitudinal tipo da zona costeira.	11
2.3	Perfil sinusoidal da onda segundo a teoria linear.	12
2.4	Tipos de rebentação caracterizados pelo parâmetro de rebentação $\xi_o$ para talude impermeável.	14
2.5	Representação em planta do ângulo de incidência $\beta$ da onda.	14
2.6	Espraçamento $R_{u2\%}$ numa estrutura impermeável com declive suave.	15
3.1	Fases dum projecto de estrutura costeira.	18
3.2	Método das malhas segundo a abordagem <i>Lagrangiana</i> e <i>Euleriana</i> .	19
3.3	Domínio de influência duma partícula em $\bar{x}$ .	20
3.4	Partículas que influenciam e não influenciam $f(\bar{x}_a)$ .	23
3.5	Domínio do problema e domínio de suporte de <i>kernel</i> .	24
3.6	Gráficos das funções de <i>kernel</i> disponíveis no programa.	24
4.1	Pormenor do modelo físico com $NMA = 0,575$ m, $R_c = 0,267$ m e $d_s = 0,108$ m.	30
4.2	Instalação e equipamento experimentais.	30
4.3	Pormenor dos blocos usados para simular a rugosidade na estrutura de protecção longitudinal.	31
4.4	Série temporal da superfície livre, sonda 1.	31
4.5	Série temporal da superfície livre, sonda 2.	32
4.6	Série temporal da superfície livre, sonda 3.	32
4.8	Série temporal da superfície livre, sonda 5.	32
4.7	Série temporal da superfície livre, sonda 4.	33
4.9	Série temporal da superfície livre, sonda 6.	33
4.10	Série temporal da superfície livre, sonda 7.	33
4.11	Série temporal da superfície livre, sonda 8.	34
4.12	Espectro de frequência das sondas 1 e 2.	34
4.13	Espectro de frequência das sondas 3 e 4.	35
4.14	Espectro de frequência das sondas 5 e 6.	35
4.15	Espectro de frequência das sondas 3 e 4.	35

5.1	Condição inicial das partículas do modelo 1. . . . .	38
5.2	Domínio computacional do modelo com a distribuição inicial das partículas de fluido (cinzento) e de fronteira sólida (preto), estrutura de defesa e batedor. . . . .	40
5.3	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 1. . . . .	41
5.4	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 2. . . . .	41
5.5	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 3. . . . .	42
5.6	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 4. . . . .	42
5.7	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 5. . . . .	42
5.8	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 6. . . . .	43
5.9	Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 7. . . . .	43
5.10	[Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 8. . . . .	43
5.11	Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 1 e 2. . . . .	44
5.12	Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 3 e 4. . . . .	44
5.13	Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 5 e 6. . . . .	45
5.14	Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 7 e 8. . . . .	45
5.15	Elevação da superfície livre em ambos os modelos. . . . .	46
5.16	Espectros de frequência em ambos os modelos. . . . .	47
5.17	Propagação da onda. . . . .	48
5.18	Deformação na crista da onda. . . . .	48
5.19	Rebentação da onda. . . . .	48
5.20	Espraçamento. . . . .	48
5.21	Refluxo. . . . .	49
5.22	Comportamento das partículas num dos testes de sensibilidade. . .	50
5.23	Pormenor do modelo numérico com $R_c=0,167$ m e $d_s=0,108$ m. . .	50
5.24	Galgamento da estrutura ( $t=9,7$ s). . . . .	50
5.25	Pormenor do modelo numérico com $R_c=0,167$ m e $d_s=0,108$ m. . .	51
5.26	Deflexão da onda no perfil côncavo da estrutura ( $t=9,7$ s). . . . .	51
6.1	Penetração de fluidos nos contornos considerados sólidos. . . . .	54
A.1	Secção transversal do modelo físico. . . . .	62
D.1	Série temporal, sonda 2. . . . .	67
D.2	Série temporal, sonda 4. . . . .	67
D.3	Série temporal, sonda 5. . . . .	68
D.4	Série temporal, sonda 6. . . . .	68
D.5	Série temporal, sonda 7. . . . .	68
D.6	Espectro de frequência, sonda 2. . . . .	69
D.7	Espectro de frequência, sonda 3. . . . .	69
D.8	Espectro de frequência, sonda 4. . . . .	69
D.9	Espectro de frequência, sonda 5. . . . .	70
D.10	Espectro de frequência, sonda 6. . . . .	70
D.11	Espectro de frequência, sonda 7. . . . .	70

# Índice de Tabelas

1.1	Objectivos e funções principais de algumas soluções de protecção.	3
2.1	Valores críticos do caudal médio de galgamento segundo vários autores. . . . .	10
2.2	Valores de $\tanh(kd)$ segundo as zonas de propagação da onda. . .	13
2.3	Valores de $\gamma_r$ devido a rugosidade na superfície do talude. . . . .	16
4.1	Posição de todas as sondas ao longo do COI 1. . . . .	30
5.1	Posição das sondas ' <i>virtuais</i> ' no SPPhysics. . . . .	39





# Lista de siglas e símbolos

## Siglas

COI	Canal de Ondas Irregulares
EUA	Estados Unidos da América
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finito
MPM	<i>Mesh-free Particle Methods</i>
NMA	Nível Médio da Água
SPH	<i>Smooth Particle Hydrodynamics</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa

## Símbolos

### *Latinas Maiúsculas*

$C$	Velocidade de propagação da onda
$C_0$	Velocidade de propagação da onda em águas profundas (" <i>offshore</i> ")
$D$	Diâmetro
$H$	Altura da onda incidente
$H_s$	Altura significativa da onda no pé da estrutura
$H_m$	Altura média da onda
$L$	Comprimento de onda
$L_0$	Comprimento de onda " <i>offshore</i> "
$P$	Pressão

$R_c$	Distância entre a cota de coroamento da estrutura e o NMA
$R_{u2\%}$	Espraçamento com 2% de probabilidade de ser excedido
$T$	Período da onda
$T_m$	Período médio da onda
$T_p$	Período de pico da onda
$W$	Função <i>kernel</i>

### *Latinas Minúsculas*

$c_0$	Velocidade do som
$d$	Profundidade em águas pouco profundas (" <i>nearshore</i> ")
$d_s$	Profundidade da água no pé da estrutura
$dt$	Passo de tempo
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Profundidade da água
$q$	Caugal médio galgado por metro linear de estrutura
$s$	Declividade da onda incidente
$s_0$	Declividade da onda incidente (" <i>offshore</i> ")
$t$	Tempo

### *Gregas*

$\alpha$	Inclinação do talude impermeável
$\beta$	Ângulo de incidência da onda
$\gamma_h$	Coeficiente de redução de profundidade relativa
$\gamma_r$	Coeficiente de redução de rugosidade da superfície do talude
$\gamma_\beta$	Coeficiente de redução da berma de pré-rebentação
$\gamma_b$	Coeficiente de redução da obliquidade da onda
$\Theta$	Termo de difusão
$\xi_0$	Parâmetro de rebentação da onda (Número de " <i>Iribarren</i> ")

$\xi_{0m}$	Parâmetro de rebentação médio, determinado com $T_m$
$\xi_{0p}$	Parâmetro de rebentação de pico, determinado com $T_p$
$\rho$	Densidade
$\rho_0$	Densidade de referência
$\nu_0$	Viscosidade cinética do escoamento laminar
$\Psi$	Termo de viscosidade
$\Omega$	Domínio ou secção de influência da função <i>kernel</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

Actualmente, as zonas costeiras aparecem associadas a áreas onde se regista grande crescimento das actividades económicas e sociais. Este crescimento é acompanhado pelo aumento exponencial da densidade populacional, o que origina maior proximidade entre frentes urbanas e a linha costeira [18]. Porém, a linha costeira apresenta vulnerabilidade e fragilidade devido aos fenómenos relacionados com a dinâmica costeira, isto é, ventos, ondas, correntes e marés. Os efeitos desses fenómenos combinados com as alterações antrópicas podem ser nefastos para as frentes urbanas uma vez que podem resultar em perdas de bens materiais e vidas devido a ocorrência de problemas tais como as inundações, galgamentos e erosão costeira (Figura 1.1).



(a) Erosão marítima na ilha de Faro [26].



(b) Galgamento de estrutura de protecção no Algarve [29].

Figura 1.1: Problemas existentes nas frentes urbanas próximas da linha costeira.

Para mitigar os problemas, é muitas vezes reivindicada a implementação de obras de protecção costeira adequadas. Conforme ilustrado na Figura 1.2, as obras de protecção costeira a implementar podem ser por alimentação artificial de praias, reabilitação de dunas, estruturas de engenharia do tipo longitudinais

aderentes, isto é, enrocamento, muros e taludes, estruturas do tipo longitudinais não aderentes como os quebramares destacados ou ainda estruturas transversais, ou seja, os esporões.



(a) Reabilitação de duna na Costa da Caparica [13].



(b) Alimentação artificial de praias [32].



(c) Quebra-mar destacado em Castelo do Neiva [30].



(d) Esporões na Ilha de Luanda [Google Earth].



(e) Estrutura de protecção marginal em Espinho [31].



(f) Obra longitudinal aderente na Figueira da Foz [Google Earth].

Figura 1.2: Exemplos de soluções de defesa costeira.

Na Tabela 1.1, encontram-se sintetizadas as suas funções essenciais, ou seja, o controlo temporário do recuo da linha da costa, avanço do mar em direcção a frente urbana e abrigo devido a agitação marítima.

<b>Tipos de estrutura</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Função principal</b>
<b>Obra longitudinal aderente</b>	Protecção dos centros urbanos costeiros de erosão, galgamento e inundação.	Reforço estrutural do alinhamento longitudinal.
<b>Revestimento</b>	Protecção de talude contra a erosão.	Reforço estrutural do alinhamento longitudinal.
<b>Esporão</b>	Contenção da erosão numa praia.	Intercepção de transporte de sedimentos por corrente de deriva litoral.
<b>Quebramar</b>	Abrigo de bacias portuárias, entradas de portos contra ondas e correntes.	Dissipação da energia da onda e/ou relaxação dessa energia de novo para o mar.
<b>Quebramar destacado</b>	Contenção da erosão numa praia ou aumento da sua largura pela forma de um tómbolo.	Redução de altura de onda e redução de volume de sedimentos transportados por corrente de deriva litoral.
<b>Quebramar destacado submerso</b>	Contenção da erosão numa praia.	Redução de altura de ondas que atingem a costa.
<b>Alimentação artificial de praias e transposição</b>	Contenção da erosão numa praia e protecção contra inundações.	Enchimento artificial de praias e dunas com sedimentos que posteriormente são erodidos.
<b>Protecção de pé de talude</b>	Prevenção de erosão costeira provocada por infraescavações.	Aumentar a resistência à erosão causada por ondas e correntes.

Tabela 1.1: Objectivos e funções principais de algumas soluções de protecção [5].

Contudo, é comum estas estruturas de engenharia de defesa costeira interferir na dinâmica dos processos costeiros. Como consequência podem ser factores indutores de erosão costeira o que resulta no incremento de problemas ambientais relacionados com alterações na linha de costa decorrentes de erosões, mudança de *habitats* com impactos na dinâmica das comunidades biológicas. Podem ainda gerar problemas económicos, tais como as perdas de edificações e degradação de estruturas localizadas à beira-mar, consequentes do aumento de processos erosivos, bem como os colapsos de substratos em locais anteriormente estáveis.

Por esta razão, a solução de defesa escolhida deve ser sustentável, ou seja, deve merecer uma análise cuidada e ponderada, conforme os problemas a superar, com o nível de intervenção pretendido, com a viabilidade económica a curto, médio e longo prazos, com a urgência da intervenção face ao nível de erosão e degradação da costa, para assim amenizar a degradação das condições naturais da dinâmica costeira e reduzir os impactos ambientais consequentes [8].

De entre os vários tipos de estruturas de protecção costeira supracitados, o estudo que se segue será focado nas estruturas longitudinais aderentes impermeáveis. As estruturas longitudinais aderentes podem ser do tipo rígida, semi-rígidas ou flexíveis conforme se encontrem dispostas em paralelo à linha de costa e ligadas ao alinhamento que se pretende reforçar. Têm como função primordial abrandar os efeitos das possíveis inundações e galgamentos de ondas consequentes das tempestades e da agitação marítima. São ainda utilizadas para delimitar arruamentos e/ou aterros marginais, protecção de estradas, habitações, entre outros. Podem ser construídas por diversos materiais (e.g. betão, madeira, blocos de rocha, gabiões, tetrápodes ou materiais metálicos) que as tornam permeáveis ou impermeáveis. A configuração dos perfis transversais variam, sendo os muros verticais os mais simples. Quando surge a necessidade de introduzir elementos dissipativos à energia da onda, estas estruturas apresentam formas inclinadas ou em degraus. Outras, na tentativa de deflectir a onda incidente para o mar, apresentam perfil transversal côncavo encurvado (Figura 1.3).

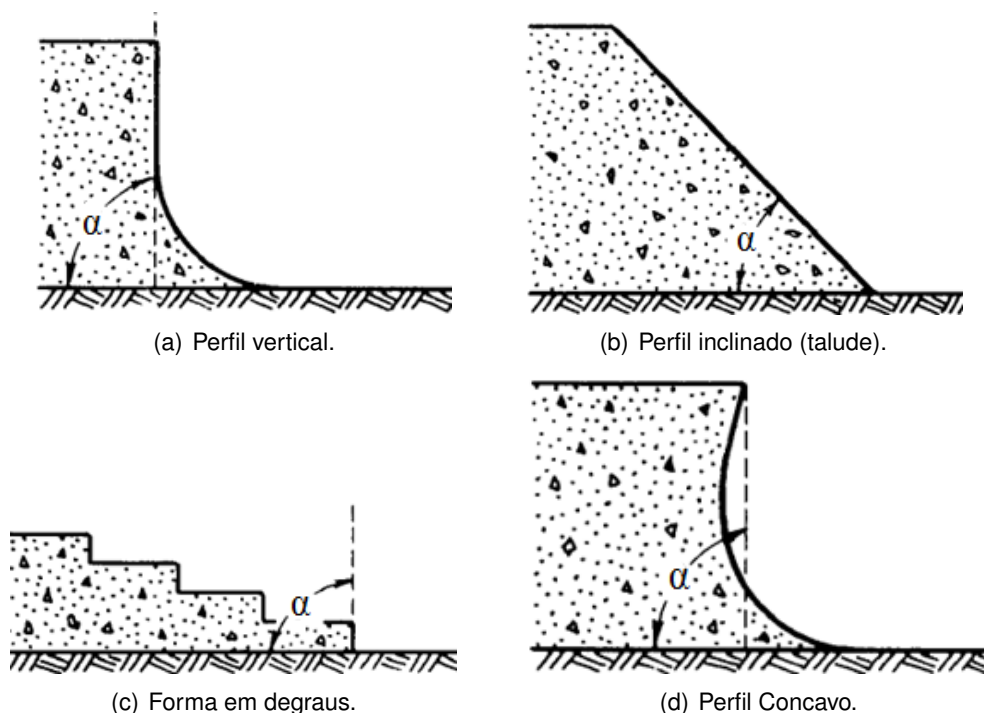


Figura 1.3: Alguns perfis de estruturas longitudinais aderentes impermeáveis [24].



Na concepção do projecto deste tipo de estrutura é primordial o conhecimento dos fenómenos que condicionam a sua eficiência. Normalmente, as infraescavações<sup>1</sup>, o espraçamento<sup>2</sup>, os assentamentos e os galgamentos resultantes da energia de agitação incidente aparecem como variáveis condicionantes no seu dimensionamento.

O galgamento aparece como factor decisivo uma vez que é determinante na configuração da estrutura, especialmente no que se refere à sua cota de coroamento. Tal acontece porque a altura do coroamento (face superior da estrutura) e o perfil transversal da estrutura estão dependentes dos níveis de galgamentos máximos aceitáveis, isto é, o nível máximo admissível de galgamento decresce segundo a susceptibilidade da zona costeira a ser protegida. Contudo, a redução do nível de galgamento implica um aumento do custo do projecto (e.g. mão-de-obra, quantidade e qualidade do material a ser empregue, equipamentos) o que indica uma acrescida necessidade em otimizar o dimensionamento destes tipos de estrutura de modo a reduzir o grau de incerteza e o sobredimensionamento a fim de estabelecer um equilíbrio entre o custos do projecto e a funcionalidade. Na fase inicial do projecto, são utilizadas ferramentas empíricas e semi-empíricas cujas constantes foram estabelecidas com base em ensaios experimentais. Mas, com a variação da acção das ondas combinada com as diferentes soluções estruturais, em certos casos as constantes podem não ser aplicáveis. Deste modo, o estudo do galgamento torna-se delicado porque não existem formulações adequadas e teriam de se recorrer a modelação física o que pode ser um processo moroso e dispendioso.

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos meios computacionais, passou a ser possível simular alguns cenários de escoamento de fluidos em superfície livre através das equações matemáticas que o descrevem. Assim, a modelação numérica tem vindo a ser estudada com o objectivo de se tornar numa ferramenta de apoio nos estudos da interacção onda e estrutura dado que, para além de apresentar flexibilidade na descrição das geometrias sem causar implicações devido a redução de escala, possibilita modificar as condições de agitação das ondas mostrando-se mais fácil, rápida e geralmente mais económica que a modelação física [20]. Todavia, existem algumas desvantagens, das quais se destaca a complexidade do processo de calibração dos parâmetros implementados no programa para poder-se obter modelos numéricos mais realistas e com erros reduzidos. Por esse motivo, apesar do modelo numérico ser uma ferramenta útil, tem vindo a ser utilizado no âmbito da investigação da interacção onda-estrutura. Assim, a modelação física de obras costeiras continua a ser a ferramenta mais completa na fase final do projecto, no estudo de determinados fenómenos, na calibração e validação de modelos numéricos [23].

---

<sup>1</sup> Fenómeno que ocorre quando a base da estrutura de defesa se torna instável e sofre rotação ao ser exposta a erosões constantes resultantes da força das ondas, podendo levar ao dessubamento da estrutura. Normalmente, isto acontece quando a base da estrutura não se encontra assente em estratos rochosos estáveis [5].

<sup>2</sup> Cota máxima atingida pela onda marítima quando esta interage com a estrutura costeira. É medida na vertical tendo como referência o nível de repouso do mar. Na literatura Anglo-Saxónica empregam-se correntemente os termos *run-up height* ou apenas *run-up* ([www.engenhariacivil.com](http://www.engenhariacivil.com)).

Os vários modelos numéricos que têm sido desenvolvidos recentemente, possuem na sua constituição a modelação em superfície livre o que permite investigar com algum pormenor a física do processo e assim prever as características fundamentais do escoamento [9]. Apoiados na teoria da dinâmica/mecânicas dos fluidos, tem-se:

- Modelos *Eulerianos* que se apoiam numa malha fixa ou dinâmica e estudam a variação no tempo das características do escoamento dum fluido [19];
- Modelos *Lagrangianos* que, quando não implementada uma malha *Lagrangeana*, segue, ao longo do tempo, a trajectória das partículas dum fluido [19];
- Rede neuronais, definidos pela aplicação do método de redes neuronais artificiais, têm se revelado apropriados para representar sistemas não lineares. O sistema no qual se baseiam é um sistema de processamento de carácter empírico que se inspira no sistema de ligações paralelas semelhantes ao do cérebro humano, o que possibilita a interligação de grande variedade de parâmetros de entrada e saída, permitindo lidar com dados imprecisos e situações parcialmente definidas. Tal capacidade confere ao método grande robustez no que toca ao processamento da informação e flexibilidade na descrição da geometria da estrutura [21];
- Modelos empíricos, definidos pela aplicação de formulações empíricas e respectivos coeficientes, são limitados quando aplicados para o cálculo do caudal médio de galgamento uma vez que a sua aplicação se restringe a um pequeno número de estruturas de configuração simples. Quando possível ser aplicado em estruturas mais complexas, é necessária a extrapolação [21].

## 1.2 Objectivos e contribuições

No presente trabalho, pretende-se analisar e apontar caminhos ou soluções para análise do galgamento de estruturas de protecção costeira impermeáveis após o impacto das ondas marítimas. Concretamente, serão criados cenários elaborados por perfis transversais com geometrias distintas expostas a uma dada condição de agitação das ondas. Para tal, utilizar-se-á um modelo numérico baseado num método das partículas livre de malha (SPH) e para o estudo de convergência do mesmo, será efectuado uma comparação com o modelo físico implementado no LNEC descrito em [2]. A convergência de resultados entre modelo numérico e físico contribuirá para a aplicabilidade do método numérico na optimização do modelo físico e na determinação do cenário óptimo a nível económico e funcional.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos. No Capítulo 1 é feita a introdução e o enquadramento geral do tema em estudo. O Capítulo 2, com um enquadramento mais específico, caracteriza os fenómenos envolvidos no galgamento bem como a teoria linear das ondas. No Capítulo 3 são descritas as características principais do método das partículas, e no 4 são apresentados os pormenores essenciais do modelo físico desenvolvido e testado no LNEC, que servirá de base para análise de convergência dos resultados. O programa SPH<sub>yscs</sub> (baseado no método SPH) aplicado na modelação numérica bem como a descrição da simulação realizada são abordados no Capítulo 5. Por último, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e os desenvolvimentos futuros.



## Capítulo 2

# Fenómeno de galgamento

### 2.1 Considerações gerais

No estudo da interação onda-estrutura, conforme ilustrado na Figura 2.1, o galgamento é o fenómeno associado a transposição do volume de água sobre o coroamento da estrutura de defesa. Geralmente, é expresso através do caudal médio,  $q$ , medido por metro linear de largura da estrutura, isto é, em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}/\text{m}$ , ou em  $\text{ls}^{-1}/\text{m}$  [20]. O seu valor depende de variáveis tais como a altura significativa da onda no pé da estrutura  $H_s$ , o comprimento de onda  $L$ , a distância entre a cota de coroamento da estrutura,  $R_c$ , e o nível médio da água (NMA), a profundidade da água no pé da estrutura  $d_s$ , o período da onda  $T$ , a inclinação da estrutura de defesa  $\alpha$ , a aceleração gravítica  $g$ , o ângulo de incidência da onda  $\beta$ , etc.

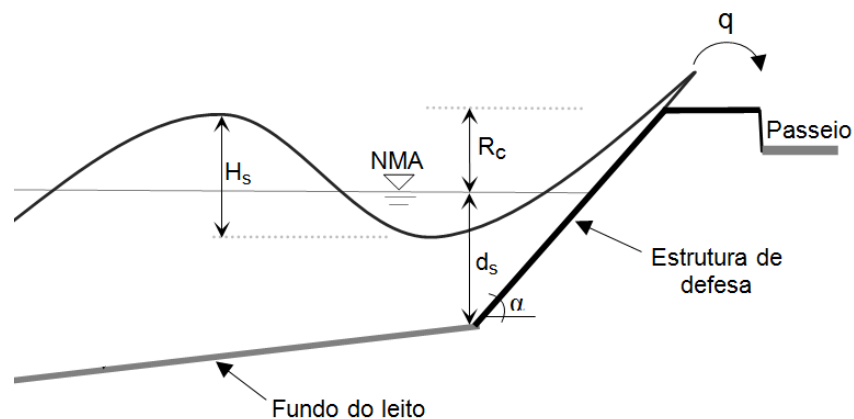


Figura 2.1: Galgamento numa estrutura de protecção longitudinal aderente.

Segundo [21], normalmente ocorrem três formas distintas de transposição de volume de água:

- *Green water* – transposição quando a cota máxima de espraio excede a cota de coroamento da estrutura e se cria uma lâmina contínua de água, que passa sobre a estrutura;

- *Splash* – transposição quando a onda rebenta sobre a parede exterior da estrutura e origina um grande volume de salpicos que passa sobre a estrutura;
- *Spray* – transposição sob a forma de borrifos que ocorre apenas por acção do vento.

A fim de estabelecer os valores críticos do caudal médio de galgamento  $q$ , bem como os potenciais danos à jusante da estrutura, o *US Army Corps of Engineers* compilou os estudos de vários autores, dando origem a Tabela 2.1.

Segurança do tráfego			Segurança estrutural		
Veículos	Pedestres	Edificações	Talude marítimo c/ revest. liso	Diques relvados	Talude marítimo c/ revest. rugoso
Inseguro a qualquer velocidade	Muito perigoso	Danos estruturais	Danos mesmo com protecção total	Danos	Danos em passeios pavimentados
			Danos no talude à tardoz		Danos em passeios não pavimentados
			Danos se o coroamento não for protegido	Início de danos	Ausência de danos
	Perigo em quebra-mares de enrocamento	Ausência de danos	Ausência de danos		
	Perigo em quebra-mares verticais				
	Desconfortável mas sem perigo			Pequenos danos em postes de iluminação etc.	
	Inseguro conduzir a alta velocidade	Molhado mas não desconfortável	Ausência de danos		
Condução segura a qualquer velocidade					

Tabela 2.1: Valores críticos do caudal médio de galgamento [24].

Porém, os valores indicados foram obtidos através de ensaios em modelos físicos específicos e, como tal, devem ser considerados apenas como uma referência grosseira porque a intensidade de rebentação sobre uma estrutura depende muito da agitação marítima considerada e da sua geometria.

A complexidade inerente ao fenómeno de galgamento como, por exemplo, a variação do nível do mar, assentamentos das estruturas de defesa e alterações do estado de agitação, muitas vezes impede que uma estrutura com probabilidade nula de ser galgada seja projectada mantendo uma boa relação custo/benefício.

Nas secções seguintes irão ser estudados os parâmetros e fenómenos citados, com particular atenção naqueles que condicionam de modo significativo o caudal médio de galgamento.

## 2.2 Parâmetros e fenómenos condicionantes

São vários os elementos que podem ser ponderados para quantificar o galgamento. No projecto de obras longitudinais aderentes impermeáveis importa realçar os fenómenos responsáveis pela agitação da superfície marítima, tais como o vento que gera às chamadas ondas de vento, os maremotos, a variação do nível do mar, assim como os parâmetros batimétricos<sup>1</sup> e estruturais.

### 2.2.1 Agitação marítima

A agitação marítima é qualificada pelos parâmetros das ondas que, por sua vez, são mutáveis devido aos fenómenos supracitados e processos de transformação da energia da onda. Considerando o perfil tipo ilustrado na Figura 2.2, os processos de dissipação ocorrem em várias etapas.

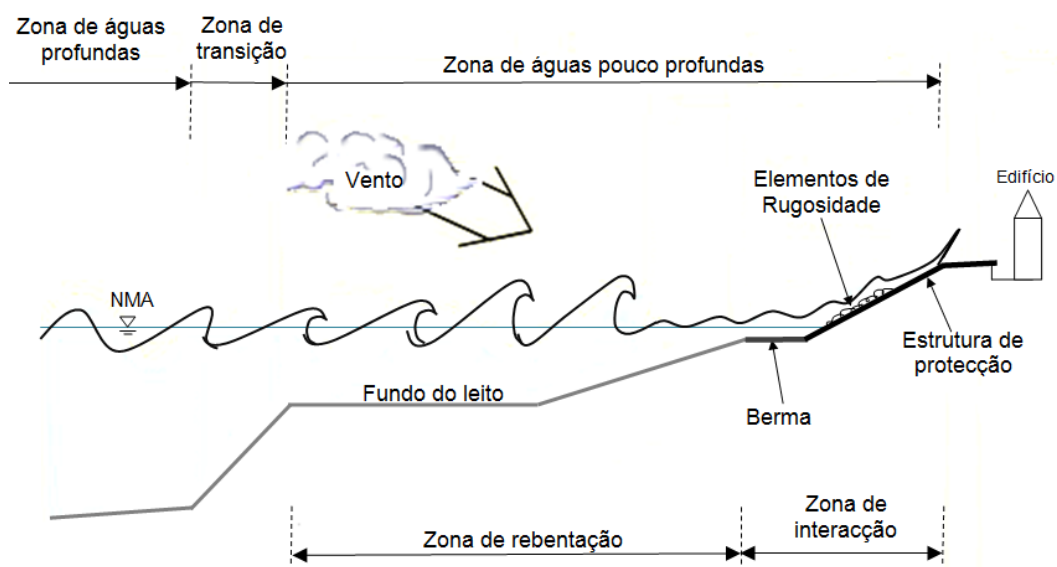


Figura 2.2: Perfil tipo da zona costeira [21].

A primeira etapa tem início quando a onda proveniente da zona de águas profundas, ao entrar na zona de transição, aumenta progressivamente a sua altura  $H$ , como resposta à redução do comprimento de onda  $L_0$ . Como resultado a declividade da onda  $s_o = H/L_0$  aumenta e o seu período  $T$  diminui. Estas transformações ocorrem porque o vórtice na base da onda, ao entrar em contacto com o fundo do leito perde velocidade devido ao atrito. Como consequência,

<sup>1</sup>Relativo a batimetria, ou seja, medição da profundidade e do relevo do fundo de mares, rios ou lagos.

a velocidade de propagação da onda,  $C$ , decresce gradualmente à medida que diminui a profundidade  $d$ . O galgamento é influenciado por esta fase de transformação dado que a altura da onda incidente pode aumentar até 200% da sua altura inicial [28]. As etapas seguintes ocorrem na zona de águas pouco profundas, onde a energia da onda é dissipada sucessivamente pelos fenómenos de rebentação, percolação, espraimento e refluxo. Em alguns casos, ao interagir com a linha da costa, parte da energia não dissipada por estes fenómenos é reflectida e/ou transmitida através da transposição da massa de água sobre a estruturas de protecção costeira – galgamento.

Na natureza, tal dissipação da onda é mutável uma vez que as fases consideradas variam aleatoriamente. Assim, o sistema de ondas apresenta características irregulares e estocásticas ao que uma descrição matemática exacta da mesma tem-se revelado impossível. Portanto, na prática corrente, os seus parâmetros são estimados principalmente por fórmulas aproximadas baseadas nos espectros de amostragem provenientes de investigações experimentais. Estas fórmulas têm como base teorias elementares da onda tal como a teoria linear da onda desenvolvida por Airy [1, 4]. É uma teoria de fácil aplicação e oferece uma aproximação razoável para uma grande gama de parâmetros da onda. No entanto, há que se ter em consideração algumas hipóteses simplificativas, tais como:

- A homogeneidade e a incompressibilidade do fluido, ou seja, a densidade  $\rho$  é constante ao longo do tempo;
- A onda é regular, bidimensional, com amplitude invariante no espaço e no tempo e apresenta uma superfície livre sinusoidal conforme apresentado na Figura 2.3.

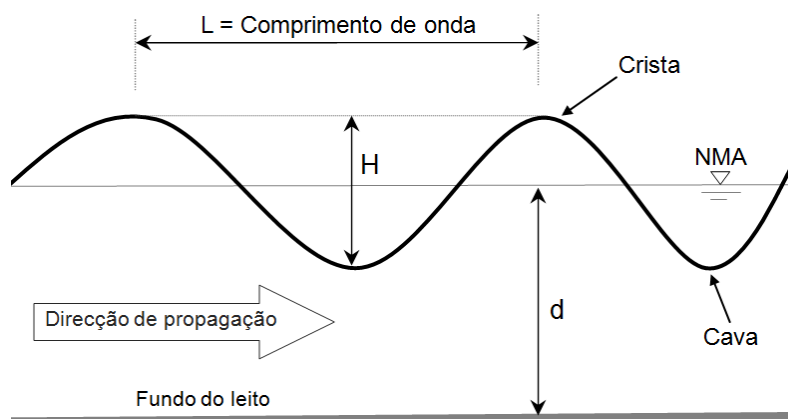


Figura 2.3: Perfil sinusoidal da onda segundo a teoria linear [4].

Segundo a teoria linear da onda, a expressão matemática aproximada para determinar o comprimento de onda  $L$ , ou seja, a distância entre duas cristas ou cavas sucessivas em função da profundidade  $d$  e do período da onda  $T$ , é dada por [4]:



$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2}{T^2g}d\right)} \quad (2.1)$$

com  $T = L/C$  e  $C$  a velocidade de propagação da onda determinada segundo a equação (2.2).

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}; \text{ com } k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.2)$$

No entanto, como exemplificado na Figura 2.2, por simplificação é possível delimitar três zonas de propagação da onda. Estas zonas classificadas segundo a sua profundidade, condicionam os parâmetros da onda durante a sua propagação. Como tal, na teoria linear das ondas, para cada zona, a parcela  $\tanh(kd)$  toma os valores aproximados indicados na Tabela 2.2.

Classificação de zonas	$d$	$\tanh(kd)$
Zona de águas profundas	$d > L_0/2$	$\approx 1$
Zona de transição	$L/20 < d < L/2$	$\tanh(kd)$
Zona de águas pouco profundas	$d < L/20$	$\approx kd$

Tabela 2.2: Valores de  $\tanh(kd)$  segundo as zonas de propagação da onda [5].

A rebentação é de suma importância para quantificar o fenómeno de galgamento. Conforme ilustrado na Figura 2.4, dependendo da batimetria e da altura de onda, a rebentação poderá ser do tipo progressiva (*spilling*), mergulhante (*plunging*), oscilante (*surging*) ou colapsante (*collapsing*). Os tipos de rebentação podem ser caracterizados pelo parâmetro de rebentação  $\xi_o$ , definido pela equação (2.3).

$$\xi_o = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2.3)$$

onde  $\alpha$  e  $s_o$  representam a inclinação do talude impermeável e a declividade da onda, respectivamente.

A rebentação progressiva ocorre em áreas com variação gradual do declive de batimetria o que possibilita uma transição progressiva da zona de águas profundas para a zona de águas pouco profundas. Segundo [28], este tipo de rebentação tem início a profundidades próximas de  $1,67H$ . Contrariamente a rebentação progressiva, a mergulhante ocorre quando há transição abrupta, ou seja, quando a zona de transição é muito íngreme a base da onda perde rapidamente a velocidade enquanto a crista mantém ou aumenta a velocidade durante a propagação. Este tipo de rebentação é responsável pelo aumento da erosão costeira. A rebentação colapsante é caracterizada por períodos de onda pequenos o que torna a sua influência para a quantificação do galgamento insignificante.

Ao contrário da rebentação colapsante, a oscilante tem uma influência muito significativa no galgamento. Tal acontece porque nas zonas de transição e de águas pouco profundas – menos espaçadas – a perda de velocidade é menor. Assim sendo, a onda apenas inicia o processo de dissipação por rebentação na zona de interacção o que faz aumentar significativamente o nível de espraioamento.

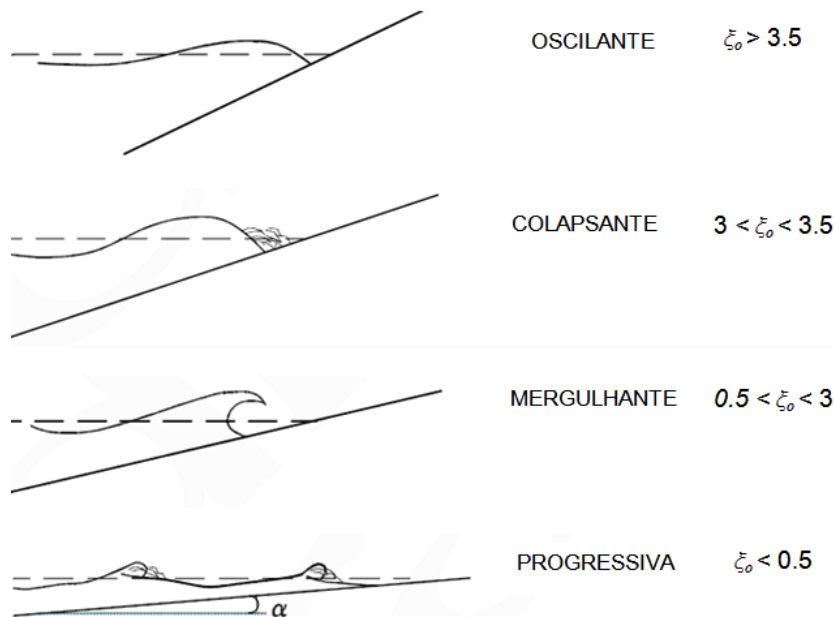


Figura 2.4: Tipos de rebentação caracterizados pelo parâmetro de rebentação  $\xi_0$  para taludes impermeáveis [5].

O ângulo de incidência das ondas  $\beta$  durante a rebentação, indicado na Figura 2.5, condiciona o impacto da rebentação e consequentemente o valor de massa de água que transpõe a estrutura. O galgamento é menor quanto maior for o ângulo entre a direcção de propagação das ondas e a direcção perpendicular à estrutura.

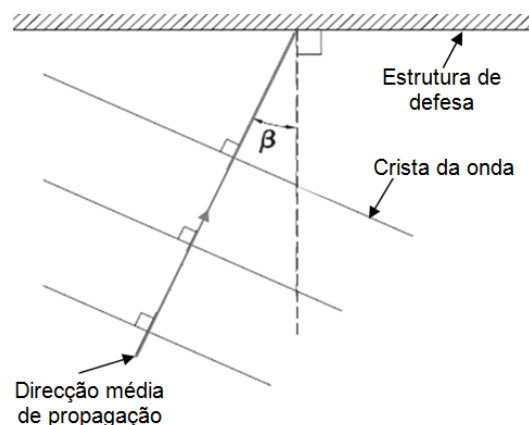


Figura 2.5: Representação em planta do ângulo de incidência  $\beta$  da onda [5].

### 2.2.2 Parâmetros geométricos e estruturais

No projecto de estruturas longitudinais aderentes, os parâmetros relacionados com a geometria do elemento são também essenciais. A cota do coroamento relativamente ao nível médio da água, a configuração do perfil transversal, a rugosidade, a permeabilidade e a inclinação são condicionantes no controlo e redução do galgamento. Na determinação da cota de coroamento é necessário analisar o nível de espraio e as sobrelevações meteorológicas<sup>2</sup> do nível do mar. Todavia, as elevações do nível da água causadas pelas sobrelevações dependem muito da fase da maré em que o fenómeno ocorre, sendo que a pior situação acontece quando existe coincidência entre uma grande sobrelevação, preia-mar equinocial e uma grande tempestade. Em vista disso, o espraio é tido como o condicionante no estabelecimento da cota de coroamento [18], ou seja, a cota de coroamento é dimensionada com uma dada probabilidade de ser transcendida através do espraio relativo  $R_{u2\%}/H_s$ . Para superfícies com inclinação suave e impermeáveis, como ilustrado na Figura 2.6, Waal e van der Meer propuseram a seguinte equação [21]:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_s} = 1.6 \xi \gamma_h \gamma_r \gamma_\beta \gamma_b \quad (2.4)$$

onde  $R_{u2\%}$  é o espraio com 2% de probabilidade de ser excedido [m],  $\gamma_h$  é o coeficiente de redução de profundidade, determinado de acordo como as condições batimétricas de cada local,  $\gamma_r$  é o coeficiente de redução de rugosidade da superfície do talude,  $\gamma_b$  é o coeficiente de redução da berma de pré-rebentação,  $\gamma_\beta$  é o coeficiente de redução da obliquidade da onda ( $\gamma_\beta = 1$  para  $\beta = 0^\circ$ ) e  $\xi$  parâmetro de rebentação,  $\xi_{om}$  ou  $\xi_{op}$ .

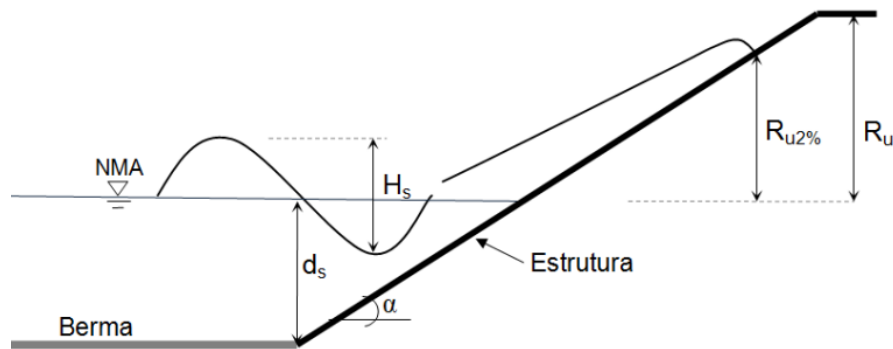


Figura 2.6: Espraio  $R_{u2\%}$  numa estrutura impermeável com declive suave [21].

A influência do  $\gamma_r$  está dependente do tipo de material e do ângulo de inclinação,  $\alpha$ , da estrutura. Através de ensaios experimentais com variações geométricas restritas, Waal e van der Meer estabeleceram que para  $1 < \xi < 4$ ,  $\gamma_r$  toma os

<sup>2</sup>Elevação do nível do mar acima do que é imposto pela maré causado por baixas pressões atmosféricas.

valores indicados na Tabela 2.3 enquanto que, para taludes com inclinação pouco acentuada, ( $\xi > 4$ )  $\gamma_r$  é aproximadamente igual a 1.

<b>Tipos de Superfície inclinadas</b>	$\gamma_r$
Lisa, Betão, Asfalto	1.0
Lisa revestida com blocos	1.0
Relvado (3 cm)	0.90 – 1.0
1 Camada de enrocamento, diâmetro D ( $H_s/D = 1.5 - 3$ )	0.55 – 0.60
2 ou mais camadas de enrocamento ( $H_s/D = 1.6 - 6$ )	0.50 – 0.55

Tabela 2.3: Valores de  $\gamma_r$  devido a rugosidade na superfície do talude [5].

Como podemos verificar, a berma de pré-rebentação, como indicado nas Figuras 2.2 e 2.6, entra como um dos factores dissipadores da energia da onda e redutores do galgamento. Logo, o estudo deste e de outros parâmetros supracitados permite determinar valores de cota de coroamento com baixa probabilidade de serem galgados, com sobredimensionamento reduzido e equilíbrio custo/benefício do projecto.

## Capítulo 3

# Método das partículas

### 3.1 Considerações gerais

Do ponto de vista de engenharia, um modelo numérico possibilita a transposição de aspectos dum problema físico contínuo num problema matemático discreto, de modo a ser resolvido através da aplicação de operações lógicas e aritméticas. Esta transposição pode ser resumida em seis etapas. Inicialmente o fenómeno físico é observado e analisado. De seguida, são definidas equações diferenciais que governam ou descrevem o fenómeno. A próxima etapa é a discretização do domínio e das respectivas equações governativas. Em geral a discretização é feita recorrendo ao método de malha (e.g. Método dos Elementos Finito - MEF) ou de partículas (*mesh-free particle methods* - MPM). Em ambos os métodos, a aproximação numérica das equações governativas tem como solução aproximada um número discreto de pontos e espera-se que quanto maior o número de pontos, mais próxima da solução exacta está a solução numérica. A etapa seguinte é a construção dos algoritmos numéricos para a resolução do sistema das equações governativas discretizadas, considerando as condições iniciais e as condições de fronteira do problema. A seguir é feita a implementação, onde é analisada a precisão computacional (erros por arredondamentos), a velocidade de processamento, a capacidade de armazenamento, etc. Por último é efectuada a simulação numérica de diversos cenários de estudos [7, 16].

Nas últimas décadas, graças ao desenvolvimento de computadores com alto desempenho e grande capacidade de armazenamento, é possível aplicar técnicas numéricas para recriação duma situação real num ambiente virtual e assim estudar fenómenos complexos, como é o caso do escoamento de fluidos em superfícies livres [7, 9, 16]. Em função da disponibilidade computacional, o desenvolvimento de algoritmos/programas contendo grandes sistemas de equações matemáticas, possibilitou a obtenção de soluções numéricas de equações cujo cálculo analítico é impraticável (e.g. equação de *Lagrange*, *Euler* ou *Navier-Stokes*). Assim sendo, hoje em dia, o engenheiro ou projectista incumbido de projectar uma estrutura de protecção costeira, durante as fases do projecto (Figura 3.1) passa a ter à sua disposição três elementos de análise fundamentais:

- Métodos analíticos;
- Métodos experimentais (modelação física);
- Métodos numéricos (modelação numérica).

Os métodos analíticos apresentam limitações, pois para além de serem aplicáveis apenas em problemas com geometrias simples, as suas hipóteses simplificativas os desviam demasiado da realidade. Contudo, têm um papel importante no que toca à validação dos métodos numéricos, quando os cenários de estudo são idênticos. Os métodos experimentais recorrem a configuração real de problemas, ou seja, a modelos físicos de problemas a fim de explorar aspectos envolvidos num determinado projecto quando o conhecimento teórico dos mesmos não é suficientemente rigoroso (Figura 3.1). Porém, o facto de desprezar o efeito de um ou dois tipos de forças (e.g. efeito da viscosidade e da tensão superficial num escoamento com superfície livre) resulta em perda de rigor na transposição dos resultados do modelo reduzido para o protótipo. Este efeito de escala é tanto maior quanto menor for a escala geométrica adoptada mas, por outro lado, quanto maior a escala geométrica mais moroso e dispendioso é o processo [14, 15]. Já os métodos numéricos apresentarem flexibilidade na descrição de geometrias, permitem obter várias condições de agitação e, ao contrário da experimentação em laboratório, apresentam resultados de forma mais rápida e económica. Mas, para se obter modelos numéricos mais realistas e com erros tão reduzidos como os do modelo físico é necessário ajustar os vários parâmetros implementados no programa através de vários testes de sensibilidade. Este processo, além de torna a modelação numérica complexa revela algumas falhas que têm impossibilitado a validação do modelo numérico. Assim, a modelação numérica é aplicada apenas na investigação de fenómenos complexos relacionados com a interacção onda-estrutura [9, 15].

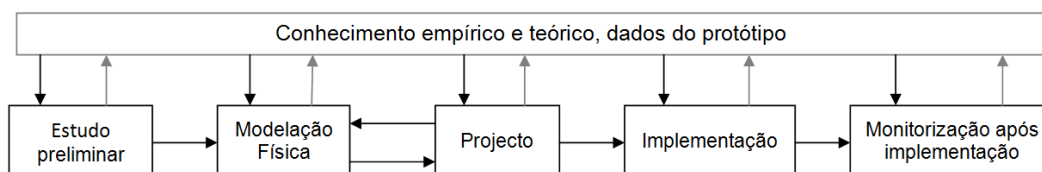


Figura 3.1: Fases dum projecto de estrutura costeira (Adaptado de [15]).

No caso do escoamento de fluidos em superfícies livres, basicamente, existem duas abordagens para descrever as equações governativas do fenómeno: as abordagens *Lagrangiana* e *Euleriana*.

A combinação entre o método das malhas e a abordagem *Lagrangiana*, resulta na malha *Lagrangiana* exemplificada na Figura 3.2(a). Durante a simulação, a deformação da malha e do material ocorre em simultâneo. Como resultado, alguns dados, tais como a posição e a massa, são obtidos nos vértices da malha. Esta combinação apresenta vantagens relacionadas com a redução do domínio computacional, adaptação da malha ao objecto, relativa facilidade

na obtenção de informação acerca do movimento da fronteira do problema e possibilidade de modelar geometrias arbitrarias. Porém, o principal inconveniente do método das malhas num sistema hidrodinâmico é a deformação, porque o modelo mostra algumas incapacidades em assegurar a informação pretendida com precisão na presença de malhas com grandes distorções. Uma possível resolução deste problema poderia ser a realização de refinamentos nas zonas de grandes deformações, no entanto, quanto mais refinada é a malha menos viável é a sua aplicação devido ao aumento de trabalho computacional. Assim sendo, este método revela-se útil quando aplicado em problemas com predominância de pequenas deformações [7, 16, 25]

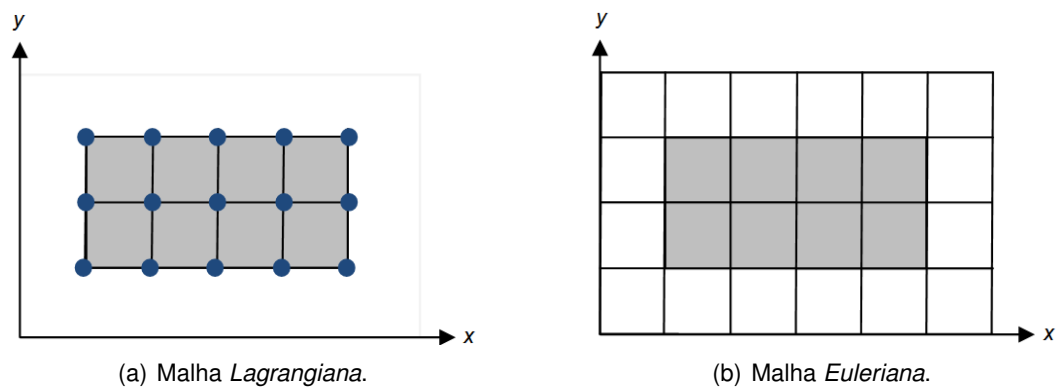


Figura 3.2: Método das malhas segundo a abordagem *Lagrangiana* e *Euleriana* [16].

Ao contrário da malha *Lagrangiana*, na malha *Euleriana* não ocorre deformação simultânea do material e da malha. Durante a simulação, o domínio espacial discretizado ilustrado na Figura 3.2(b) permanece fixo e o material em questão move-se nas suas células e vértices. Esta libertação de movimento cria algumas desvantagens tais como dificuldades em modelar geometrias complexas uma vez que nestes casos é necessário uma discretização mais refinada para melhorar a precisão. É de referir ainda que, durante o cálculo computacional, há desperdício de tempo a calcular áreas vazias. Contudo, esta combinação permite grandes deformações sem causar problemas relacionados com a falta de precisão. Tais características permitem a sua aplicação nos estudos de explosões e impactos de alta velocidade dado que para um determinado ponto no espaço, é possível obter a velocidade e a pressão em função do tempo [7, 9, 16, 25].

No MPM, o domínio do objecto é discretizado num número finito de partículas que representam o estado e registam as variações do sistema. Através das equações que governam o problema, as partículas podem ter associada uma característica física, como por exemplo, podem ser geradas como partículas de água, fronteiras fixas e/ou animadas (i.e. batedor do tipo pistão ou flexível) numa análise hidrodinâmica. Neste exemplo, cada partícula agrega variáveis tais como a massa, velocidade, energia, posição, etc., e a evolução do sistema é determinada pela conservação de massa, da quantidade de movimento e energia [9, 16]. O

domínio do problema não é coberto por uma malha pré-definida. Porém, para garantir a interacção/conectividade das partículas (continuidade do problema) é aplicada uma técnica de discretização numérica, em que o valor aproximado duma certa grandeza associada a uma dada partícula é calculado através da multiplicação duma função de ponderação pelos valores da mesma grandeza nas partículas da vizinhança [16]. Logo, considerando o exemplo ilustrado na Figura 3.3, a componente da velocidade  $u$  duma partícula  $i$  contida no domínio do problema numa posição  $\bar{x} = (x, y, z)$ , é dado por:

$$u(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N u_i \phi_i(\bar{x}) \quad (3.1)$$

onde  $N$  é o número de partículas dentro do domínio de influência da partícula  $i$ ,  $u_i$  e  $\phi_i$  são, respectivamente, a velocidade e a função de ponderação da partícula  $i$  que considera a influência de todas as partículas contidas no seu domínio de influência.

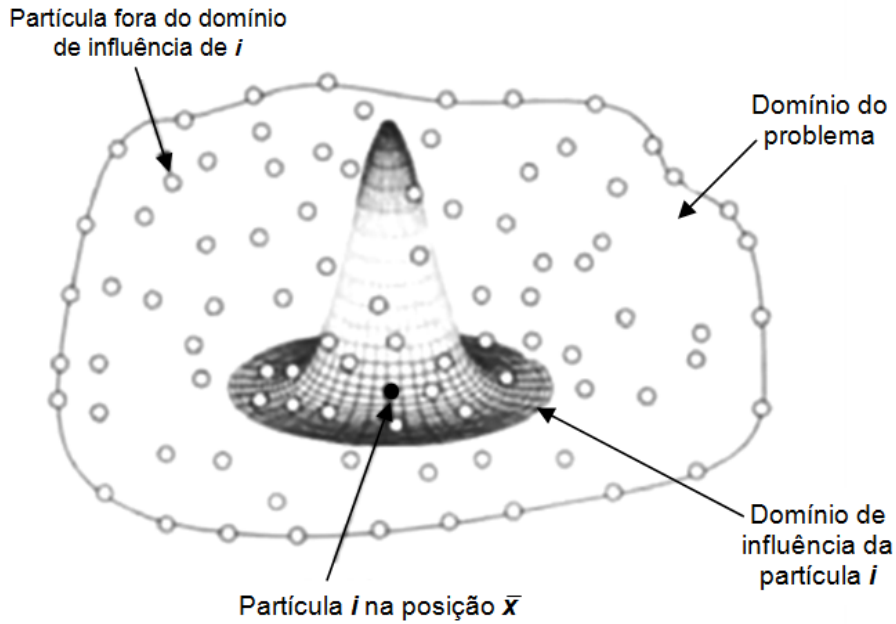


Figura 3.3: Domínio de influência duma partícula em  $\bar{x}$  [16].

Assim sendo, pode-se afirmar que a função de ponderação, tal como a malha, é o suporte do MPM pelo facto de ter um papel muito importante na interacção das partículas e na eficiência do método numérico. Portanto, ao contrário do método das malhas, o MPM apresenta relativa facilidade no que toca a simulação de problemas com grandes deformações, geometria arbitrárias, comportamento não linear do material (e.g. rebentação da onda) e descontinuidades do sistema (e.g. fracturas). Em contrapartida, surgem alguns inconvenientes tal como o aumento do esforço computacional causado pela quantidade de interacções necessárias



entre partículas da vizinhança e alguns problemas de convergência consequentes de inconsistências na discretização das equações governativas e da instabilidades derivada do aumento de diversos erros presentes na simulação numérica (e.g. arredondamentos, erros de interacção) [10, 12, 16].

Actualmente, no âmbito dos estudos de interacção onda-estrutura já existem alguns programas de cálculo em diferentes etapas de desenvolvimento, cada um deles com as suas vantagens e limitações consoante o campo de aplicação. De entre os existentes, destacam-se o AMAZON, o COBRAS-UC e o SPHysics [19].

Em Portugal, o LNEC efectuou estudos de validação dos programas AMAZON, COBRAS-UC e SPHysics [9]. O AMAZON e o COBRAS-UC foram aplicados com bons resultados em estudos de interacção onda-estrutura. O primeiro, no que toca ao estudo do galgamento de estruturas impermeáveis e o COBRAS-UC nos diferentes estudos de interacção de ondas com estruturas impermeáveis e porosas. Relativamente ao SPHysics, desde 2007 que tem sido corrigido e utilizado no estudo de interacção onda e estrutura impermeáveis.

Não obstante, o estudo que se segue será focado no programa SPHysics uma vez que este tem como base o método das partículas (SPH).

### 3.2 Método das partículas (SPH)

O SPH é um MPM inicialmente desenvolvido para resolver problemas tridimensionais na área da astrofísica em espaço aberto e conforme detalhado em [16], tem várias aplicações nesta área. Devido a similitude dos problemas astrofísicos estudados e o movimento do fluido, o SPH começou a ser adaptado para o estudo de problemas na área da hidrodinâmica. A adaptação, feita através do desenvolvimento adequado das equações de *Navier-Stokes* na abordagem *Lagrangiana*, dotou o método de propriedades tais como a capacidade de acompanhar a trajectória e armazenar a informação de cada partícula dum fluido. No entanto, devido ao facto de no SPH o problema apresentar-se discretizado num número finito de partículas livre de malha, houve a necessidade de garantir a interacção entre as partículas para assim assegurar a evolução do sistemas discreto. A compilação do método de interacção com as equações governativas resultou nas equações SPH, capazes de respeitar leis básicas da mecânica dos fluidos, tais como, a conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia [7].

Na prática, a eficiência do SPH depende da formulação do método de aproximação das partículas porque, dependendo da função de ponderação escolhida, a precisão do modelo pode ser alterada [12, 16, 25]. Na secção seguinte, serão resumidos alguns conceitos e formulações principais do SPH, ou seja, o método de aproximação do sistema de partículas do fluido, a equação que traduz o comportamento/estado do fluido e as respectivas equações governativas SPH.

### 3.2.1 Método de aproximação das partículas

Segundo [16], o valor da função de aproximação para uma dada grandeza determina-se pela integração dos valores da função nos pontos vizinhos ponderados por uma função  $W$ , função esta definida a partir da manipulação da função delta de *Dirac*. Assim, a função de aproximação duma partícula em  $\bar{x}$  relativamente a uma partícula em  $\bar{x}'$  descrita por uma função diferenciável  $f$ , é dada por:

$$f(\bar{x}) = \int_{\Omega} f(\bar{x}') W(\bar{x} - \bar{x}', h) d\bar{x}' \quad (3.2)$$

A sua derivada é dada por:

$$\nabla f(\bar{x}) = - \int_{\Omega} f(\bar{x}') \nabla W(\bar{x} - \bar{x}', h) d\bar{x}' \quad (3.3)$$

sendo  $h$  o raio do domínio de influência  $\Omega$  em torno da partícula em  $\bar{x}$  e  $W(\bar{x} - \bar{x}', h)$  a função de ponderação ou função *kernel*.

Para uma boa aproximação, a função de ponderação deve ser monótona decrescente com o aumento da distância entre  $\bar{x}$  e  $\bar{x}'$  e tem de ter outras características que asseguram a normalização e a consistência no domínio de influência [16], ou seja,

$$\int_{\Omega} W(\bar{x} - \bar{x}', h) d\bar{x}' = 1 \quad (3.4)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\bar{x} - \bar{x}', h) d\bar{x}' = \delta(\bar{x} - \bar{x}'), \text{ sendo } \delta \text{ o delta de Dirac} \quad (3.5)$$

$$W(\bar{x} - \bar{x}', h) \geq 0, \text{ dentro do domínio } \Omega \quad (3.6)$$

$$W(\bar{x} - \bar{x}', h) d\bar{x}' = 0 \text{ fora do domínio } \Omega \quad (3.7)$$

A condição dada pela equação (3.7) é uma das bases do método de aproximação, isto porque permite que as interações entre partículas sejam efectuadas em subdomínios locais contidos no domínio global do problema. Tal propriedade, quando implementada de forma adequada, resulta numa redução significativa do esforço computacional [16].

Considerando que no SPH o sistema é representado por um número finito de partículas que contêm massa e ocupam um volume no espaço (Figura 3.4), a função de aproximação da partícula genérica  $a$  relativamente a  $b$ , contidas no mesmo subdomínio, é dada por [12]:

$$f(\bar{x}_a) = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} f(\bar{x}_b) W_{ab} \quad (3.8)$$

onde a função  $f(\bar{x}_a)$  traduz a aproximação da função  $f$  associada a partícula  $a$  na posição  $\bar{x}_a$ ,  $f(\bar{x}_b)$  é o valor da função  $f$  associada a partícula  $b$  na posição  $\bar{x}_b$ ,  $W_{ab} = W(\bar{x}_a - \bar{x}_b, h)$  é o valor da função de ponderação na posição  $(\bar{x}_a - \bar{x}_b)$ ,  $m_b$  e  $\rho_b$  são, respectivamente, massa e a densidade da partícula  $b$ .

A derivada da função de aproximação é determinada segundo as equações (3.9) e (3.10).

$$\nabla f(\bar{x}_a) = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} f(\bar{x}_b) \nabla_a W_{ab} \quad (3.9)$$

onde,

$$\nabla_a W_{ab} = W(\bar{x}_a - \bar{x}_b, h) = \frac{\bar{x}_{ab}}{r_{ab}} \frac{\partial W_{ab}}{\partial r_{ab}} \quad (3.10)$$

sendo  $\bar{x}_{ab} = \bar{x}_a - \bar{x}_b$  e  $r_{ab} = |\bar{x}_a - \bar{x}_b|$  a distância entre as partículas.

A aproximação discreta indicada na equação (3.9), simplifica o uso do método SPH e torna conveniente a sua aplicação nos problemas hidrodinâmicos onde a densidade é uma das variáveis chave [16].

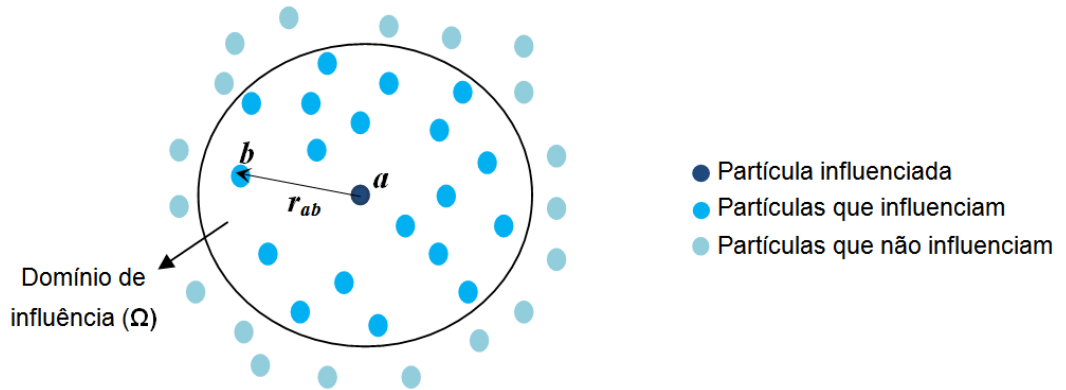


Figura 3.4: Partículas que influenciam e não influenciam  $f(\bar{x}_a)$  [7].

Na literatura, é possível encontrar diversas funções *kernel* [16]. Segundo o exemplo da Figura 3.5, estas funções dependem da dimensão do domínio de suporte definido pelo diâmetro  $kh$  (sendo  $k$  o factor de escala) e da distância adimensional entre partículas dado por  $R = r_{ab}/h$ .

Nestas condições, para se obter dois ou mais domínios de suporte contidos no domínio do problema, o parâmetro  $kh$  deve ser menor que o domínio do problema e, para garantir a interacção inicial entre as partículas contidas no domínio de suporte de  $W$ ,  $kh/2$  deve ser superior à separação inicial das partículas ( $d_x$ ).

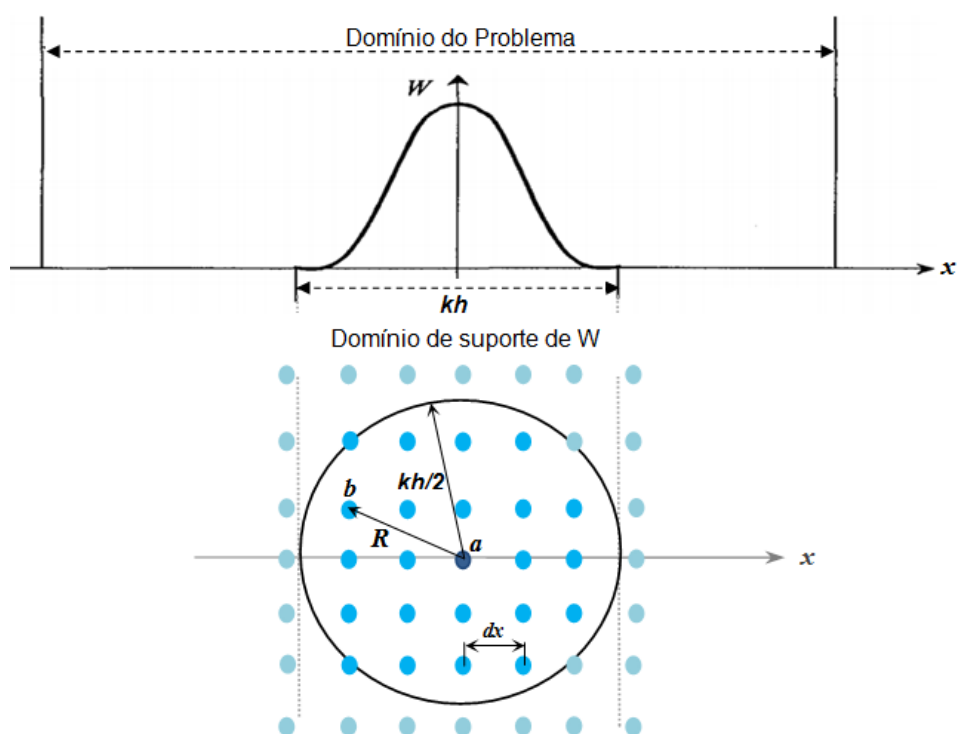


Figura 3.5: Domínio do problema e domínio de suporte de *kernel* [16, 25].

No programa SPHysics, o utilizador tem a sua disposição quatro funções de ponderação. Estas funções têm o comportamento indicado no gráfico da Figura 3.6.

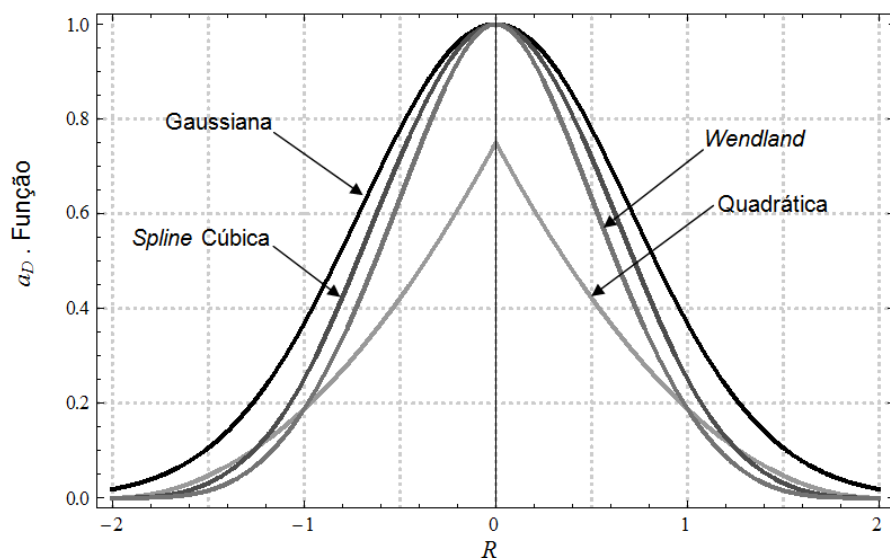


Figura 3.6: Gráficos das funções de *kernel* disponíveis no programa.

Em termos numéricos, tem-se:

1) Função Gaussiana,

$$W(R, h) = a_D e^{-R^2} \quad (3.11)$$

onde o factor dimencional  $a_D = 1/(\pi h^2)$  em 2D ou  $a_D = 1/(\pi^{3/2} h^3)$  em 3D.

2) Função Quadrática,

$$W(R, h) = a_D \left[ \frac{3}{16} R^2 - \frac{3}{4} R + \frac{3}{4} \right] \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (3.12)$$

onde  $a_D = 2/(\pi h^2)$  em 2D ou  $a_D = 5/(4\pi h^3)$  em 3D.

3) Função *Spline* Cúbica,

$$W(R, h) = a_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} R^2 + \frac{3}{4} R^3 & 0 \leq R \leq 1 \\ \frac{1}{4} (2 - R)^3 & 1 \leq R \leq 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases}$$

onde  $a_D = 10/(7\pi h^2)$  em 2D ou  $a_D = 1/(\pi h^3)$  em 3D.

4) Função *Wendland*,

$$W(R, h) = a_D \left( 1 - \frac{R^4}{2} \right) (2R + 1) \quad 0 \leq R \leq 2 \quad (3.13)$$

onde  $a_D = 7/(4\pi h^2)$  em 2D ou  $a_D = 21/(16\pi h^3)$  em 3D.

Entretanto, ao longo da análise dinâmica, a distância entre partículas pode, eventualmente, reduzir. Quando tal acontece, algumas funções de ponderação revelam-se instáveis e como tal acarretam problemas numéricos que levam a imprecisão com erros elevados. Logo, para melhorar o equilíbrio entre a precisão e a eficiência, são implementadas variáveis correctivas [7, 16]. No SPHysics, estas variáveis correctivas são automaticamente activadas sempre que necessário [12].

### 3.2.2 Comportamento do fluido

Como veremos a seguir, o cálculo do termo da pressão na equação da quantidade de movimento é deveras importante para simular o escoamento de fluido uma vez que o movimento das partículas é impulsionado pelo gradiente da pressão. Por simplificação, na Mecânica dos Fluidos os fluidos são tidos como incompressíveis, logo, a densidade mantém-se constante ao longo do tempo. Contudo, como na realidade os fluidos têm alguma compressibilidade, o SPH admite a hipótese do fluido ser quase-incompressível através da aplicação da compressibilidade artificial [12, 16] dada pela equação de estado (3.14).

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3.14)$$

onde  $\gamma = 7$ ,  $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$  é tido como a pressão inicial,  $\rho_0 = 1000 \text{ kg m}^{-3}$  a densidade de referência e  $c_0$  a velocidade do som.

Deste modo, em vez de implementar a equação de pressão de *Poisson* – onde o fluido é considerado incompressível e como tal é necessário adoptar intervalos de tempo extremamente pequenos – a pressão no fluido é determinada pela equação (3.14) com uma variação de densidade de aproximadamente 1% [9, 12].

### 3.2.3 Aproximação discreta da densidade da partícula

A formulação para definir a aproximação da densidade das partículas para além de garantir a conservação da massa é ainda responsável pela distribuição das partículas. Considerando ainda a ilustração da Figura 3.5, no SPHysics a aproximação discreta da densidade é dada pela seguinte equação:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \bar{\mathbf{v}}_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (3.15)$$

onde  $\rho_a$  é a densidade da partícula genérica  $a$ ,  $m_b$  é a massa da partícula genérica  $b$ ,  $\bar{\mathbf{v}}_{ab} = \bar{\mathbf{v}}_a - \bar{\mathbf{v}}_b$  é o vector de velocidade relativa entre as partículas e  $\nabla_a W_{ab}$  é determinado segundo a equação (3.10).

Esta abordagem possibilita o cálculo directo da densidade, o que por si só aumenta o desempenho computacional. A equação (3.15) mostra claramente que a taxa de variação de densidade de uma partícula está intimamente relacionada com as velocidades relativas entre essa partícula e todas as outras contidas no domínio de suporte. No entanto, a contribuição destas velocidades relativas é determinada pelo gradiente da função de ponderação.

### 3.2.4 Aproximação discreta da quantidade de movimento

A fim de garantir a conservação da quantidade de movimento durante a simulação da onda ou o impacto da mesma sobre a estrutura de protecção sem haver oscilações não físicas, foram consideradas no SPH três equações que traduzem a dissipação viscosa. Estas equações variam segundo a dissipação ou viscosidade considerada. Logo, tendo em conta um meio contínuo e considerando os seguintes tipos de viscosidade implementados no SPHysics, a quantidade de movimento do sistema pode ser dada por [12]:

#### 1) Viscosidade artificial

$$\frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \bar{\mathbf{g}} + \bar{\Theta} \quad (3.16)$$

onde  $\bar{v}$  é a velocidade,  $t$  é o tempo,  $\rho$  e  $\nabla P$  são respectivamente a densidade e o gradiente da pressão,  $\bar{g} = (0, 0, -9.81) \text{ ms}^{-2}$  é a aceleração gravitacional e  $\bar{\Theta}$  é o termo de difusão.

### 2) Viscosidade laminar

$$\frac{D\bar{v}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \bar{g} + \nu_o \nabla^2 \bar{v} \quad (3.17)$$

onde  $\nu_o$  é a viscosidade cinética do escoamento laminar ( $0.893 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ )

### 3) Viscosidade laminar associada ao modelo de turbulência SPS – *Sub-Particle Scale*

$$\frac{D\bar{v}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \bar{g} + \nu_o \nabla^2 \bar{v} + \frac{\nabla \bar{\tau}}{\rho} \quad (3.18)$$

onde  $\bar{\tau}$  representa o tensor da tensão no SPS.

No formalismo SPH, segundo o exemplo da Figura 3.5, a equação discreta que descreve a evolução da quantidade de movimento quando adoptada a viscosidade artificiala, é dada por [17]:

$$\frac{d\bar{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \bar{g} \quad (3.19)$$

onde  $\bar{v}_a$  é a velocidade da velocidade da partícula genérica  $a$ ,  $t$  é o tempo,  $P_a$  e  $\rho_a$  são, respectivamente, a sua pressão e densidade,  $P_b$  e  $\rho_b$  são, respectivamente, a pressão, a densidade da partícula genérica  $b$  contida no domínio de suporte de  $W$ ,  $m_b$  é a sua massa,  $\Pi_{ab}$  é o parâmetro de viscosidade artificial.

Todavia, em [9] verificou-se que no estudo onda-estrutura, a aplicação da viscosidade artificial na simulação, introduz ao modelo numérico uma difusão que altera significativamente a altura das ondas e leva a diminuição da amplitude das ondas com o aumento do parâmetro de viscosidade artificial.

Na viscosidade laminar, o termo de difusão é substituído pelo termo da tensão laminar definida em [12], ou seja,

$$\frac{d\bar{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} + \bar{g} + \nu_o \nabla^2 \bar{v} \quad (3.20)$$

A equação discreta da quantidade de movimento acoplada à viscosidade laminar associada ao modelo de turbulência SPS é semelhante à equação (3.20). Porém é acrescentado o termo que traduz a dissipação consequente da turbulência do

escoamento. Deste modo, segundo [12], a taxa de quantidade de movimento é calculado por:

$$\frac{d\bar{V}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} + \bar{g} + v_o \nabla^2 \bar{v} + \frac{\nabla \bar{\tau}}{\rho} \quad (3.21)$$

onde  $\bar{\tau}$  representa o tensor da tensão no SPS.

### 3.2.5 Aproximação discreta da energia interna

No formalismo SPH, a equação da energia é baseada na primeira lei da termodinâmica, ou seja, lei da conservação de energia. Como tal, a variação da energia interna  $e$  duma partícula genérica  $a$  relativamente a partícula  $b$  é igual a soma das energias cinéticas e da energia térmica (devido a tensão entre a partícula e a fronteira do problema). Assim sendo, a equação discreta que descreve a evolução da energia interna de uma dada partícula do fluido em função do tempo, é dada por [12, 16]:

$$\frac{de_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \bar{v}_{ab} \nabla_a W_{ab} + \Psi_{ab} \quad (3.22)$$

onde  $\Psi_{ab}$  é o termo da viscosidade que varia consoante os tipos de viscosidade acima mencionados.



## Capítulo 4

# Modelo físico

### 4.1 Características do modelo físico

Os ensaios experimentais considerados nesta dissertação, para validação do modelo numérico, foram obtidos pelo LNEC, num modelo físico que teve como base um protótipo com secção transversal definida por um talude duma praia com um declive de 1:20, o qual termina numa estrutura de protecção costeira impermeável com um declive de 3:2 e com as seguintes características [2]:

- Períodos de onda, ( $T_1 = 8$  s,  $T_2 = 12$  s e  $T_3 = 14$  s);
- Alturas de onda incidente, ( $H_1 = 1$  m e  $H_2 = 2$  m);
- Profundidades, ( $h_1 = 10$  m e  $h_2 = 11$  m);
- $\Delta h$  de aproximadamente 0,5 m.

Através da aplicação da teoria de semelhança de *Froude* [14], o protótipo foi reduzido à escala 1:20 resultando no modelo físico ilustrado no Anexo A e pormenorizado na Figura 4.1. Nestas condições, um dos vários cenários analisados no LNEC em modelo físico correspondia às seguintes características [2]:

- 3 Períodos de onda, ( $T_1 = 1,79$  s,  $T_2 = 2,68$  s e  $T_3 = 3,13$  s);
- 2 Alturas de onda incidente, ( $H_1 = 0,10$  m e  $H_2 = 0,20$  m);
- 1 Profundidade ( $h_2 + \Delta h$ ) de 0,575 m.

Os ensaios para as diferentes condições de agitação foram realizados no Canal de Ondas Irregulares 1 (COI 1), indicado na Figura 4.2. O Canal com cerca de 30 m de comprimento, 0,8 m de largura e com uma altura de 1 m, encontrava-se equipado com um batedor do tipo pistão, um sistema de absorção activa para compensação das reflexões AWASYS [6], sondas resistivas e sensores de pressão para medir a elevação da superfície livre e a pressão, respectivamente, em diversos pontos ao longo do canal e na estrutura. Na Tabela 4.1 está indicada a posição longitudinal de cada sonda relativamente ao batedor.

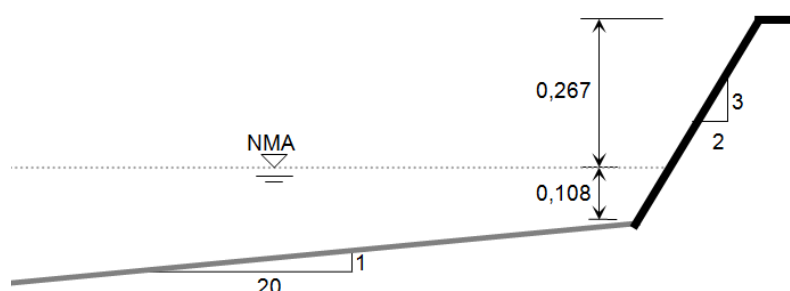


Figura 4.1: Pormenor do modelo físico com  $NMA = 0,575$  m,  $R_c = 0,267$  m e  $d_s = 0,108$  m [2].

Os ensaios contemplaram ondas regulares e ondas irregulares. No caso das ondas regulares a duração do ensaio foi de cerca de 300 s, enquanto para o caso de ondas irregulares os ensaios tiveram uma duração entre os 1300 s e os 3200 s, com o objectivo de gerar cerca de 1000 ondas [2].

Sonda	1	2	3	4	5	6	7	8
Distância ao batedor (m)	3,230	3,530	25,635	25,885	26,135	26,385	26,635	26,885

Tabela 4.1: Posição de todas as sondas ao longo do COI 1 [2].

Para medir o volume total galgado durante o ensaio, foi instalado um tanque no tardo da estrutura onde a variação do nível de água foi medida por um limnómetro<sup>1</sup>.



(a) Canal de ondas Irregulares 1.



(b) Sonda resistiva.

Figura 4.2: Instalação e equipamento experimentais [2, 6].

<sup>1</sup>Limnómetro consiste num flutuador que segue as variações do nível da superfície da água e cujo movimento é transmitido a um dispositivo de leitura ou de registo denominado limnógrafo [6].

O talude da estrutura de protecção longitudinal foi construído em madeira e possuía vários elementos de rugosidade, em blocos irregulares, com dimensões aproximadas de 7 cm por 7 cm (Figura 4.3).



Figura 4.3: Pormenor dos blocos usados para simular a rugosidade na estrutura de protecção longitudinal [2].

## 4.2 Resultados do modelo físico

No âmbito deste trabalho, apenas será considerada para análise o caso à escala 1:20, com ondas regulares, período  $T_2 = 2,68$  s, altura da onda  $H_1 = 0,10$  m e a profundidade da água de  $h = 0,575$  m. Nestas condições, o galgamento foi de  $9,03 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/m/s e os valores  $T_m$  e  $H_m$  resultantes foram 2,652 s e 0,081 m respectivamente. Segundo os dados fornecidos pelo LNEC, o registo da variação do nível da água registada pelas 8 sondas, nos primeiros 30 s de ensaio, está representado nas Figuras 4.4 a 4.11.

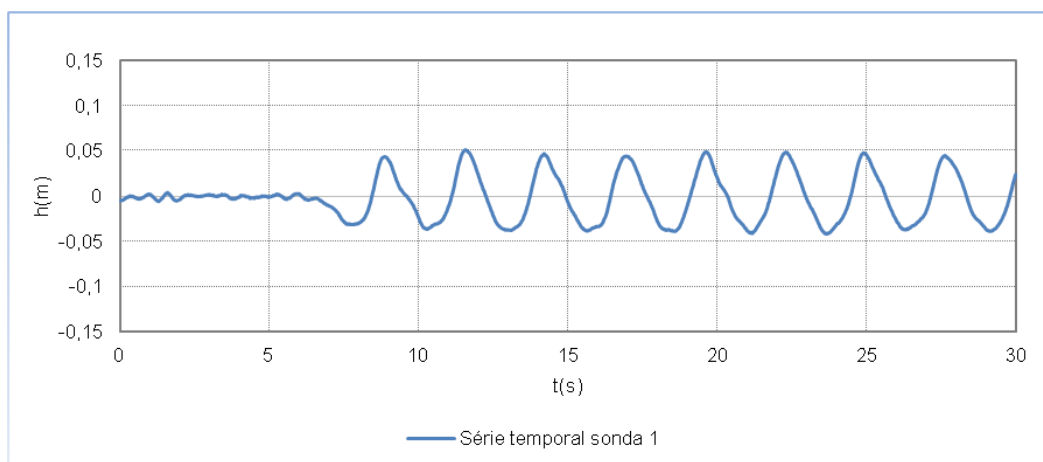


Figura 4.4: Série temporal da superfície livre, sonda 1.

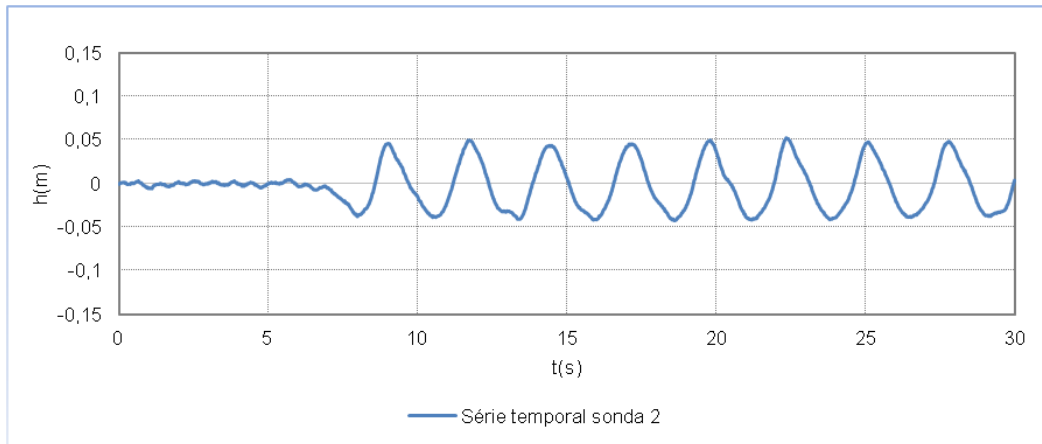


Figura 4.5: Série temporal da superfície livre, sonda 2.

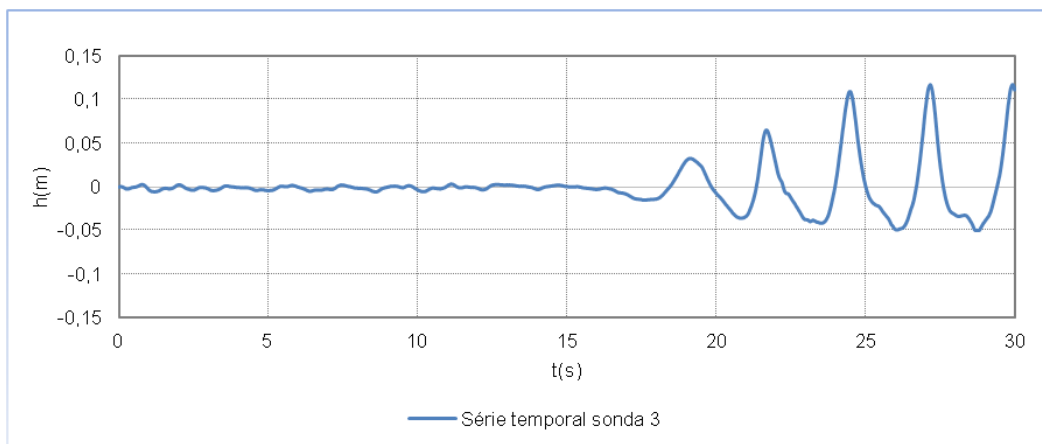


Figura 4.6: Série temporal da superfície livre, sonda 3.

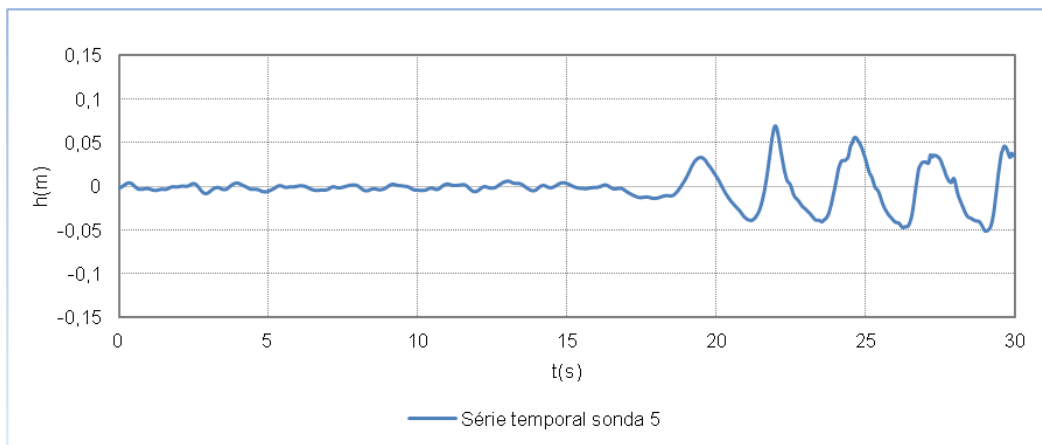


Figura 4.8: Série temporal da superfície livre, sonda 5.

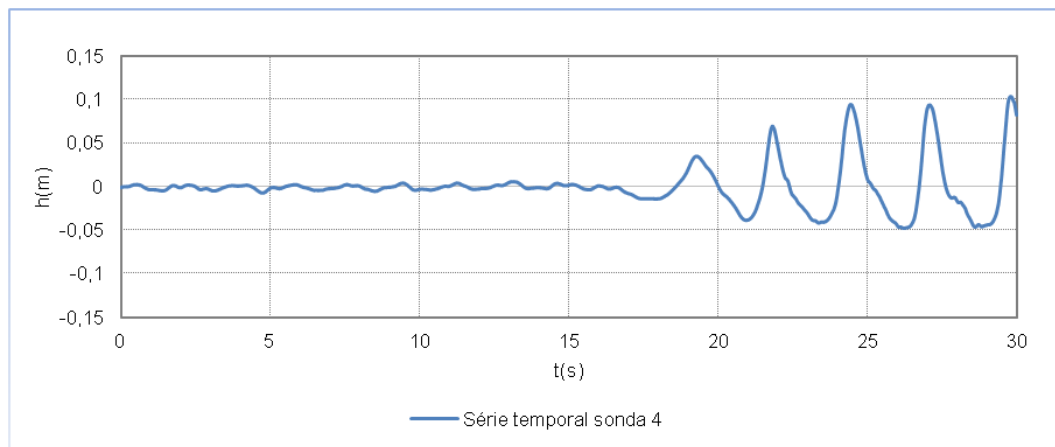


Figura 4.7: Série temporal da superfície livre, sonda 4.

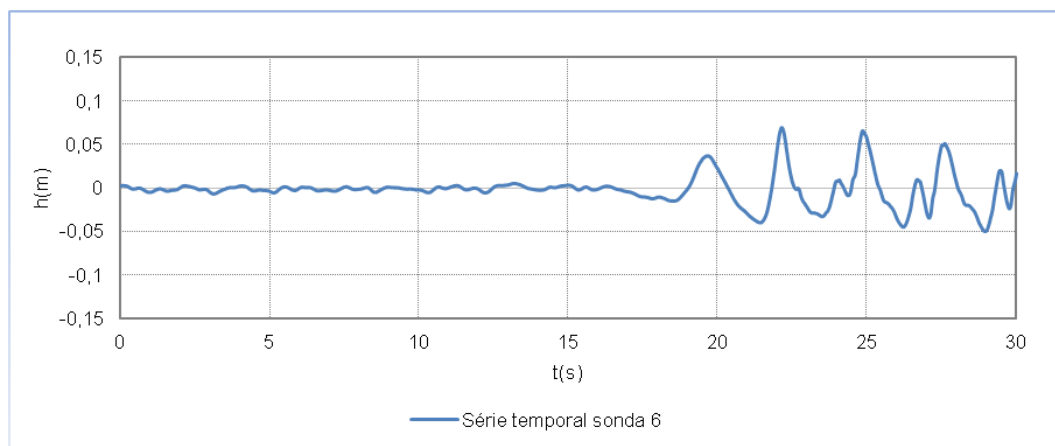


Figura 4.9: Série temporal da superfície livre, sonda 6.

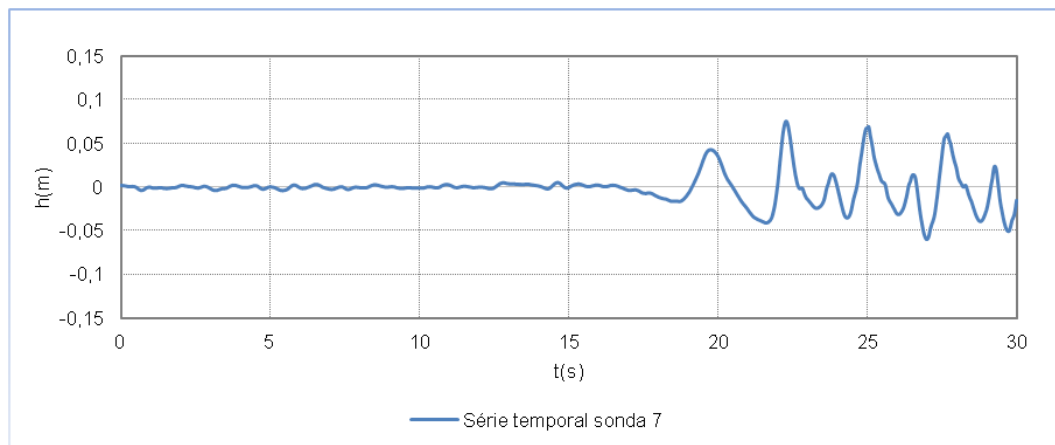


Figura 4.10: Série temporal da superfície livre, sonda 7.

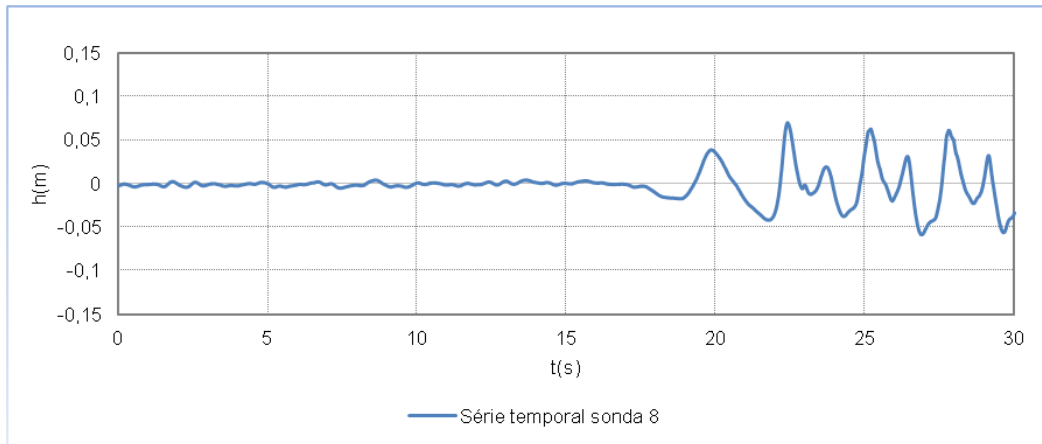


Figura 4.11: Série temporal da superfície livre, sonda 8.

Segundo [2], nestas condições foram registados período médio  $T_m$  de 2,652 s e altura média da onda,  $H_m$ , de 0,081 m.

Nas Figuras 4.12 a 4.15 é possível observar-se as variações de energia segundo os espectros de frequência determinados pelas 8 sondas.

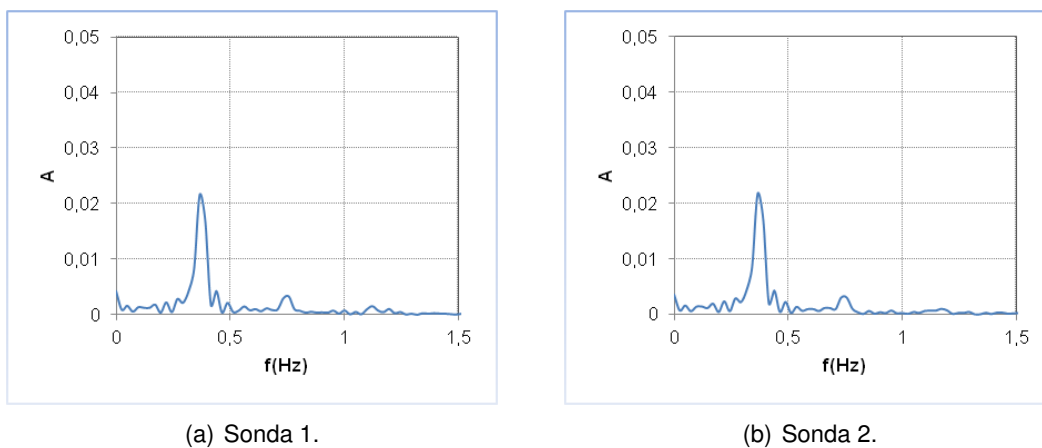
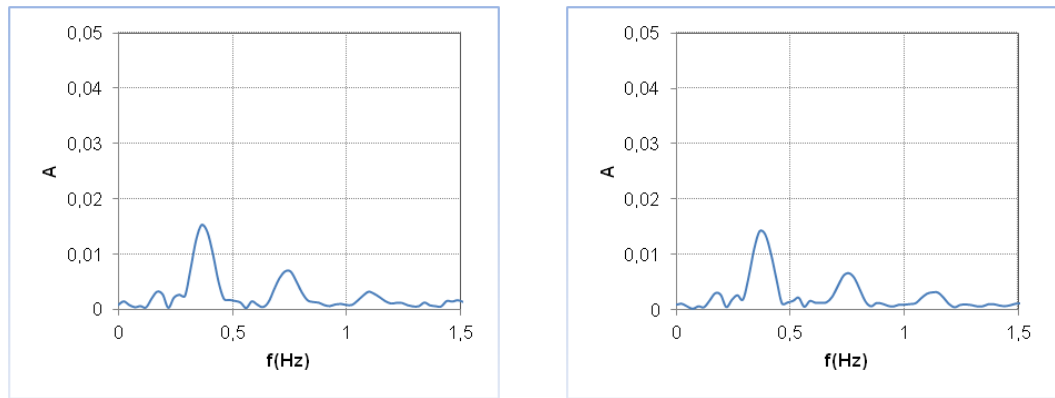


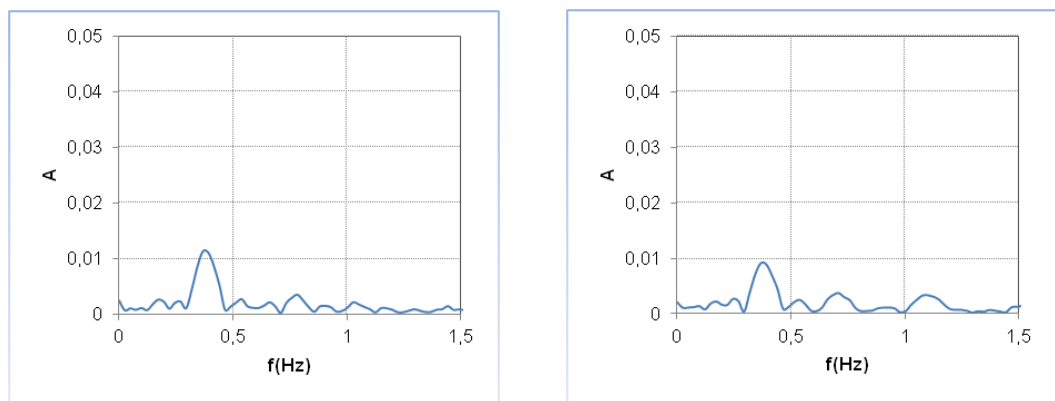
Figura 4.12: Espectro de frequência das sondas 1 e 2.



(a) Sonda 3.

(b) Sonda 4.

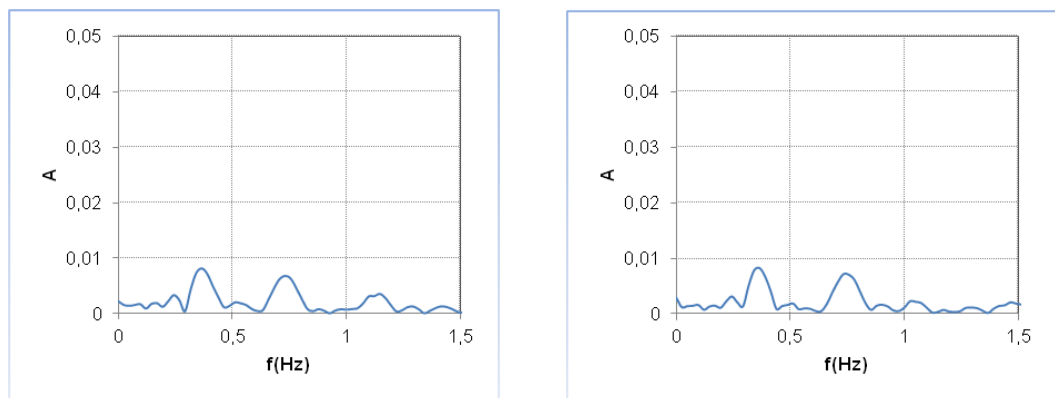
Figura 4.13: Espectro de frequência das sondas 3 e 4.



(a) Sonda 5.

(b) Sonda 6.

Figura 4.14: Espectro de frequência das sondas 5 e 6.



(a) Sonda 7.

(b) Sonda 8.

Figura 4.15: Espectro de frequência das sondas 7 e 8.





## Capítulo 5

# Simulação no SPHysics

### 5.1 SPHysics

O SPHysics é um programa de cálculo '*free ware*' empregue no estudo de fenómenos hidrodinâmicos proveniente da colaboração de um grupo de investigadores das universidades Johns Hopkins (EUA), de Vigo (Espanha), de Manchester (Reino Unido) e La Sapienza (Roma, Itália) [33]. O seu código, baseado nas equações SPH, encontra-se escrito em várias linguagens de programação (e.g. fortran, MPI, C++, CUDA) e para diversas plataformas computacionais. Permite simular fenómenos tais como a agitação regular e irregular da onda, rebentação, espraçamento, galgamento, impacto das ondas sobre estruturas costeiras impermeáveis, escoamento em fundos impermeáveis, rotura de barragens, etc. A sua primeira versão foi lançada em Agosto de 2007 e desde então o código tem sido aprimorado [33].

Na presente dissertação é utilizada a versão SPHysics\_2D\_ v2.2.001, lançada em Janeiro de 2011.

### 5.2 Características do código

O processo de modelação e visualização dos resultados, como detalhado em [12], pode ser descrito através de três subprogramas:

- 1) O de pré-processamento que determina as condições iniciais, ou seja, posição inicial das partículas de fronteira, condições de limites e a distribuição ortogonal inicial das partículas do fluido;
- 2) O de processamento, que permite resolver as equações SPH do caso de estudo;
- 3) O de pós-processamento, onde se encontram as rotinas de visualização de resultados.

Na fase de pré-processamento o utilizador tem a sua disposição várias escolhas. Entre estas, as de maior relevância para o estudo realizado nesta dissertação são: as funções *kernel*, uma vez que a sua escolha condiciona a eficiência computacional e a precisão do modelo; os esquemas de evolução do tempo de simulação; a equação de estado; o tipo de condição de fronteira sólida (e.g. força repulsiva); o tratamento de viscosidade pretendido; a aplicação de diferentes tipos de objectos em movimento ou não (e.g. objectos flutuantes, batedor, estrutura de defesa costeira, etc.); o tempo total e frequência de aquisição da simulação; a opção para iniciar e reiniciar a simulação; a interacção com passo de tempo variável.

No processamento, o programa resolve as equações SPH. Segundo [12], para melhorar eficiência computacional, o domínio de calculo é dividido em elementos quadrados de  $2h$  de lado.

Concluída a simulação, os subprogramas de pós-processamento em *Matlab* [11] ou *Paraview* [34], permitem obter informações em pontos definidos, relativa a densidade, pressão, velocidades horizontais e verticais e posição da superfície livre [12].

No entanto, a correcta utilização do modelo exige um bom conhecimento do mesmo uma vez que, apesar de o programa incluir algumas demonstrações, para certos casos de estudos o utilizador terá de adaptar o código e/ou subrotinas. Como poderemos ver mais adiante, a execução das simulações requer um tempo considerável. Há ainda que ter em conta que é necessário efectuar vários estudos de sensibilidade de alguns parâmetros do programa dependendo do caso de estudo [10].

### 5.3 Descrição do modelo numérico

No âmbito desta dissertação, para validação do SPHysics, foi implementado o perfil ilustrado na (Figura 5.1), baseado no modelo físico detalhado no Capítulo 4.

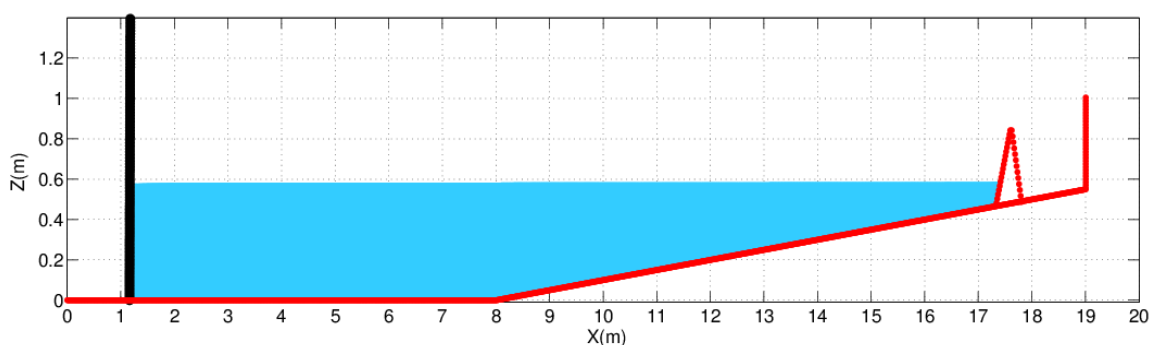


Figura 5.1: Condição inicial das partículas do modelo numérico.

Como observado na Figura 5.1, o modelo físico não foi representado na sua totalidade, isto é, nos seus 30 m de comprimento. Em vez dos 30 m determinou-se uma distância de cerca dum comprimento de onda entre a fronteira de geração das ondas e o primeiro obstáculo, para que as ondas geradas se adaptassem ao fundo antes de atingir o talude da praia, garantindo assim que a onda fosse o mais regular possível. Considerando a equação (2.1) e a simplificação dada pela Tabela 2.2 para zonas de águas pouco profundas, calculou-se o comprimento de onda, para o caso mais gravoso, o qual resultou em cerca de 6,37 m. Isto implicaria considerar uma distância de aproximadamente 7 m desde o batedor até ao início do talude da praia, sendo que, por uma questão de precaução – influenciada pela posição do batedor – foram considerados 8 m, originando numa redução de cerca de 12 m dos 20 m do talude da praia do protótipo. O facto de considerar-se uma dimensão inferior resulta numa diminuição considerável do tempo de cálculo sem implicar variações consideráveis no resultado. Esta redução, aplicada a posição das sondas 'virtual', resulta na Tabela 5.1.

Sonda	1	2	3	4	5	6	7	8
Distância a origem do eixo (m)	3, 230	3,530	13,635	13,885	14,135	14,385	14,635	14,885

Tabela 5.1: Posição das sondas 'virtual' no SPHysics.

Na fase de pré-processamento é definido o ficheiro de dados que contém as características do modelo. A informação presente no ficheiro pode ser consultada no Anexo B.

De entre os parâmetros escolhidos no ficheiro de pré-processamento, foi utilizado o *kernel* quadrático uma vez que este não necessitava de gradiente de correcção [7]; optou-se também pelo esquema numérico *predictor-corrector* [12] para integração no tempo. Quanto as condições iniciais, como ilustrado na Figura 5.2(b), as partículas de fluido são distribuídas ortogonalmente, semelhante aos nós duma malha quadrada regular. Para evitar situações pouco realistas que ocorrem quando é ignorada a interacção entre partículas interiores e exteriores (fronteira sólida), é empregue uma força de repulsão nas partículas de fronteira, ou seja, é activada a condição de fronteira repulsiva.

O batedor do tipo pistão flexível sem absorção dinâmica da reflexão, disposto à esquerda da Figura 5.2(a), permite simular ondas regulares com as características do perfil de velocidade vertical duma onda, de acordo com a profundidade e considerando a teoria linear da onda. O passo de tempo,  $dt = 10^{-4}$  s, varia consoante os termos de difusão viscosa. Esta variação permite reduzir a ocorrência de instabilidades numéricas na presença de flutuações de grandezas físicas, tal como a velocidade. A pressão é calculada a partir da equação de estado (3.14).

No entanto, para obter a altura da onda,  $H = 0,10$  m, com as características

pretendidas, foi necessário realizar algumas análises de sensibilidade. Tais análises foram efectuadas em alguns parâmetros do batedor, como por exemplo, o `X_PaddleCentre`, `flap_length`, `Wavemaker Stroke`. Através de análises de sensibilidade – tendo como referência os valores definidos nas demonstrações do programa semelhantes ao modelo numérico estudado – verificou-se que na zona plana as ondas eram mais sinusoidais e estáveis, quando a força repulsiva aplicada era de  $8 \times 10^{-4}$  e eram menos estáveis, quando a força repulsiva era de  $10^{-5}$ .

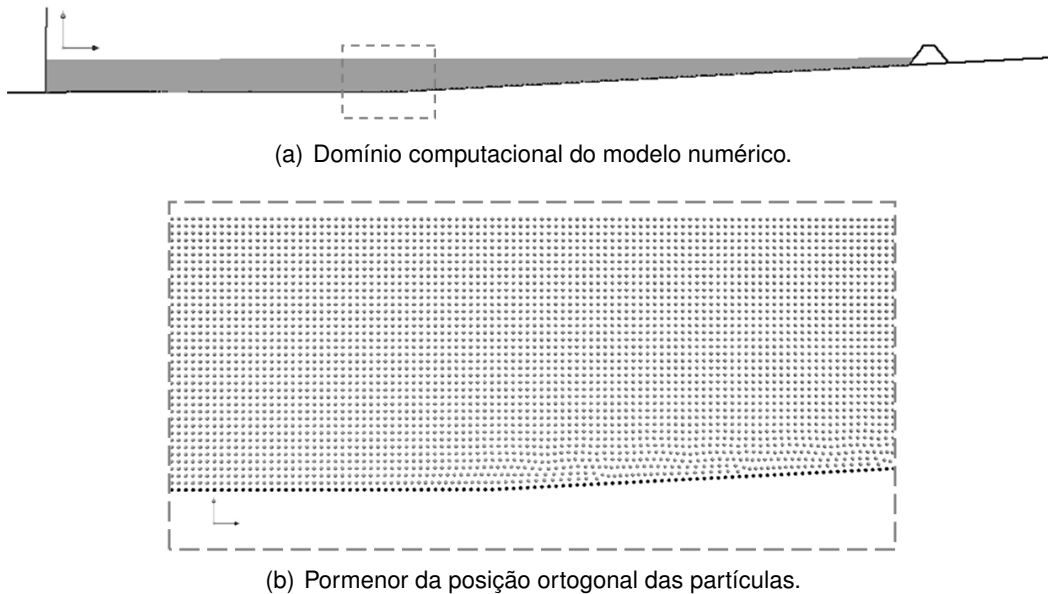


Figura 5.2: Domínio computacional do modelo com a distribuição inicial das partículas de fluido (cinzento) e de fronteira sólida (preto), estrutura de defesa e batedor.

Na fase de processamento, são criados ficheiros com os resultados. Após a simulação, para análise e visualização dos resultados, utilizaram-se rotinas de pós-processadores definidas em *Matlab* e *ParaView*. Considerando que a distância inicial entre partículas é de 0,015 m, ou seja, cada partícula corresponde a  $2,25 \text{ m}^3/\text{m}$  de volume do fluido, é possível determinar o galgamento e verificar a convergência dos resultados entre os modelos físico e numérico. Porém, para analisar a oscilação da superfície livre, isto é, a série temporal de ondas no modelo numérico, foi necessária a criação duma rotina de análise e recolha de informação nos ficheiros resultantes do pós-processamento. Esta rotina, `post_sph.f`, encontra-se no (Anexo C).

Embora a duração dos ensaios no modelo físico tenham sido de 300 s [2], optou-se por efectuar a simulação em 50 s, isto porque, no âmbito deste trabalho, o aumento do tempo de simulação excederia o prazo execução. No entanto, observou-se que ao fim de 30 s as ondas eram menores e não lineares devido a re-reflexão das ondas que interagem com a estrutura e como consequência, relativamente ao

galgamento, não foram observadas diferenças significativas entre uma simulação de 50 s e de 30 s.

## 5.4 Resultados do modelo numérico

O domínio de cálculo, o intervalo e o passo de tempo considerados permitiu reduzir significativamente o tempo de simulação, ou seja, o esforço computacional. Os gráficos indicados nas figura seguintes, apresentam o registo da variação do nível de água em função do tempo numa posição fixa segundo as posições indicadas na Tabela 5.1.

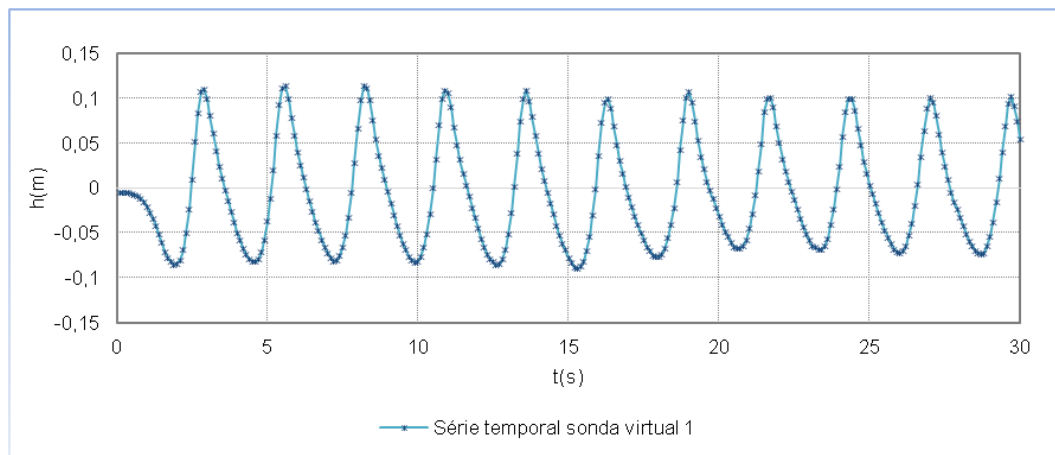


Figura 5.3: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 1.

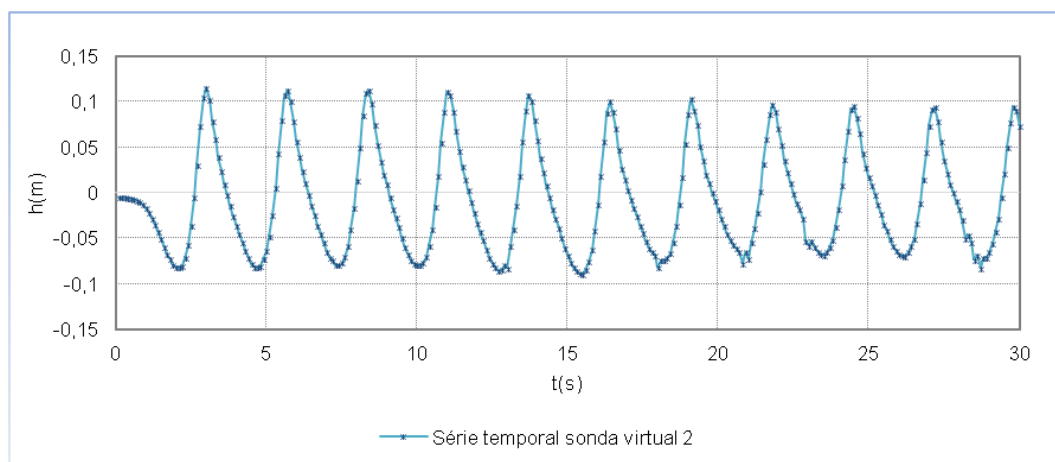


Figura 5.4: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 2.

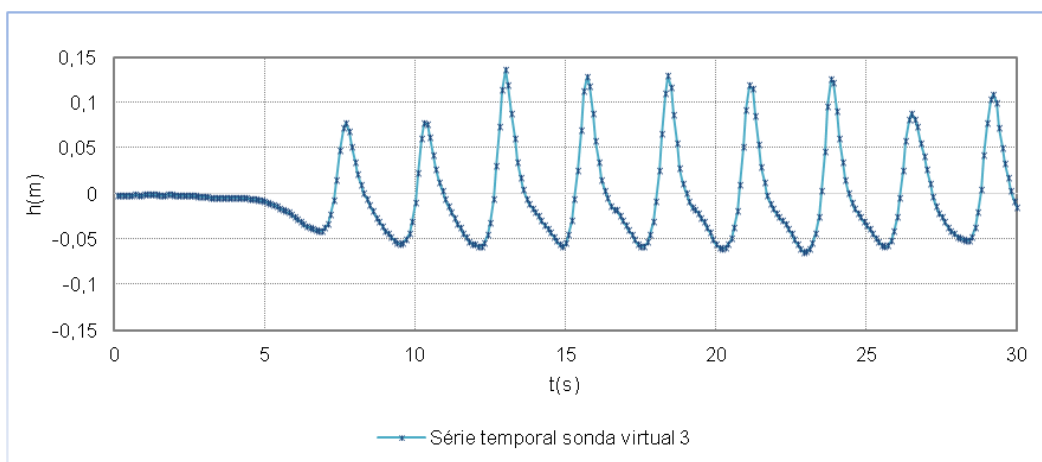


Figura 5.5: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 3.

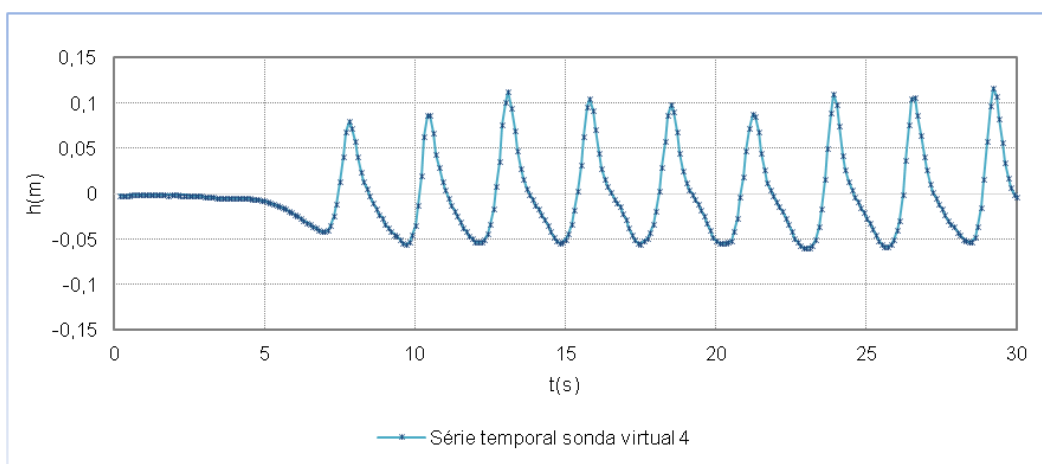


Figura 5.6: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 4.

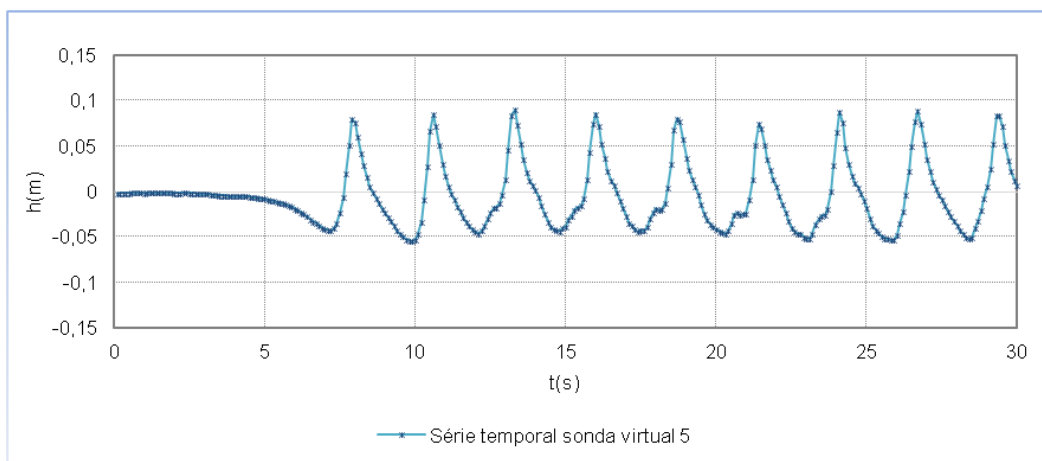


Figura 5.7: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 5.

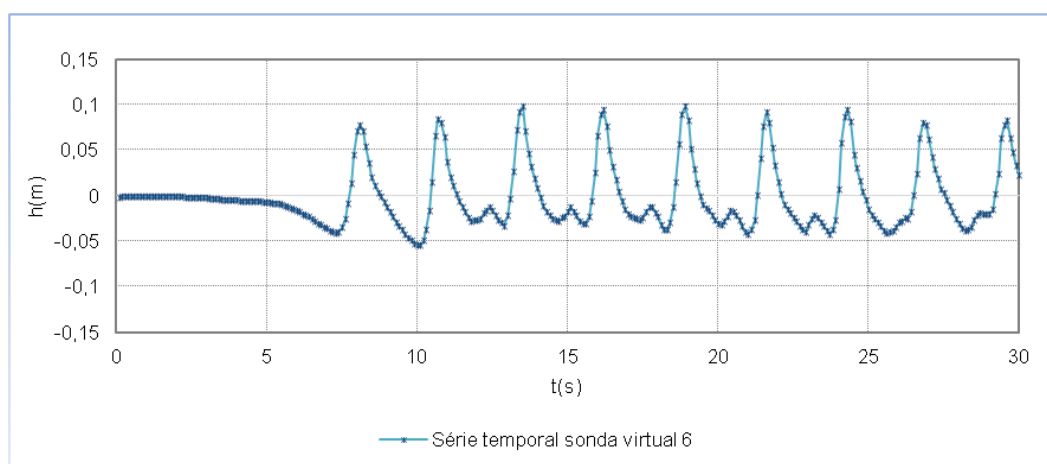


Figura 5.8: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 6.

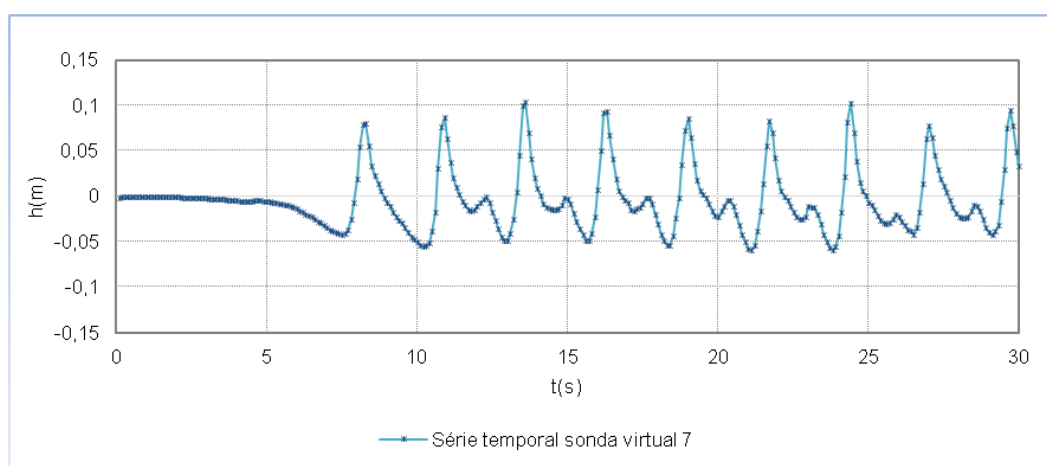


Figura 5.9: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 7.

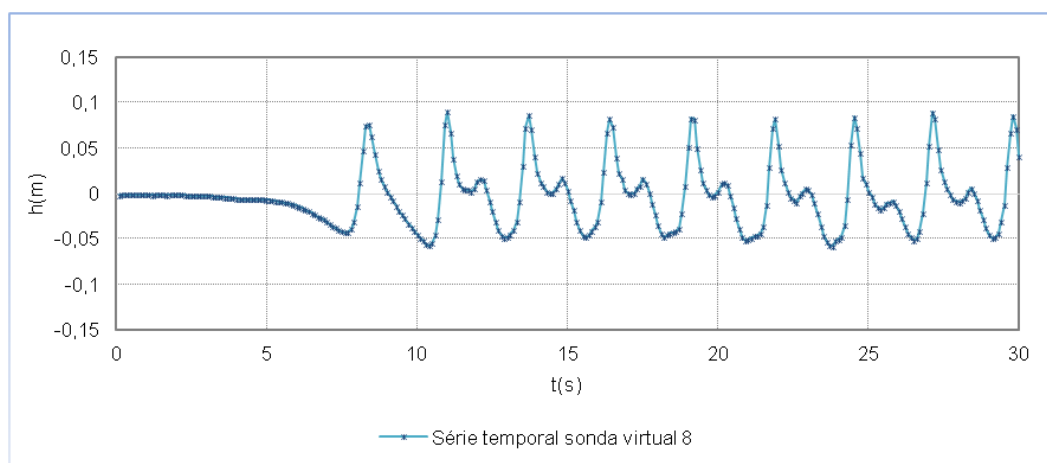


Figura 5.10: Série temporal da superfície livre, sonda 'virtual' 8.

Com aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) sobre as séries de dados registados, segundo as posições das sondas 'virtuais', obtem-se os espectros de frequência (Figuras 5.11 a 5.14) que possibilitam estimar as variações de energia durante a propagação das ondas.

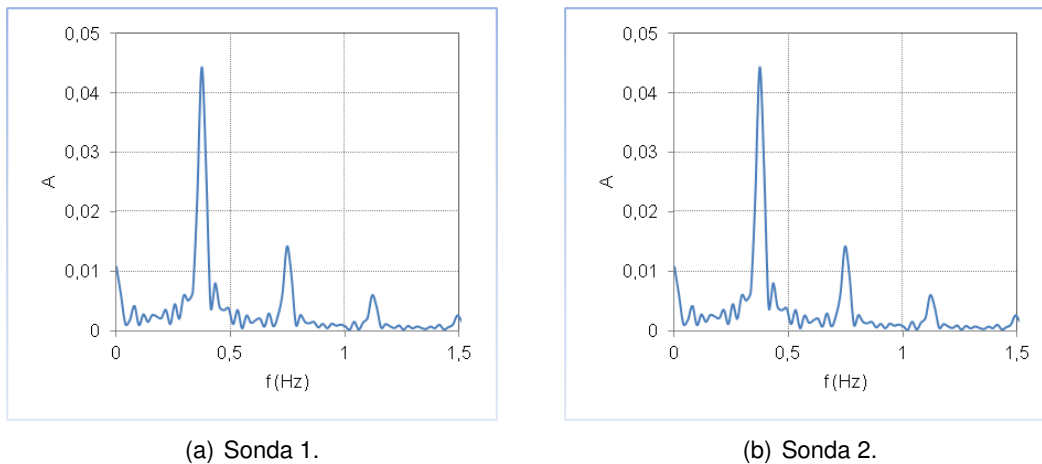


Figura 5.11: Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 1 e 2.

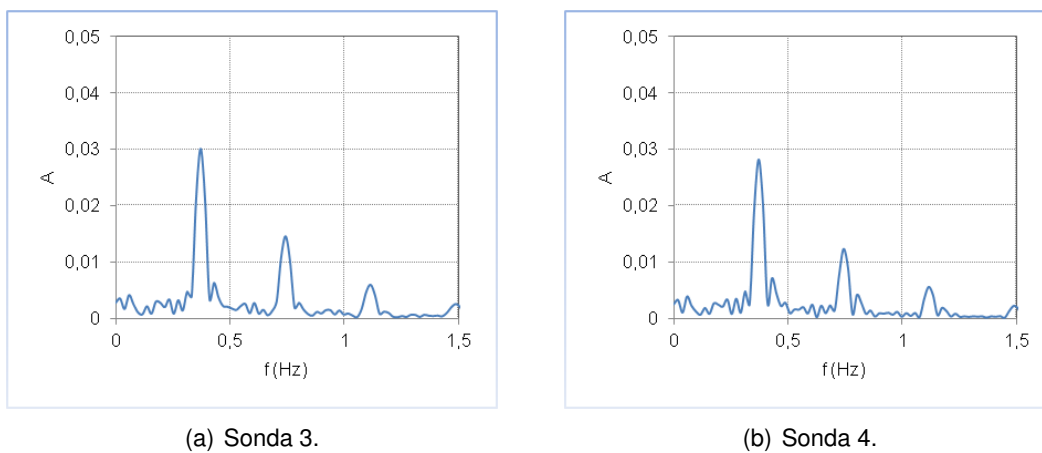


Figura 5.12: Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 3 e 4.



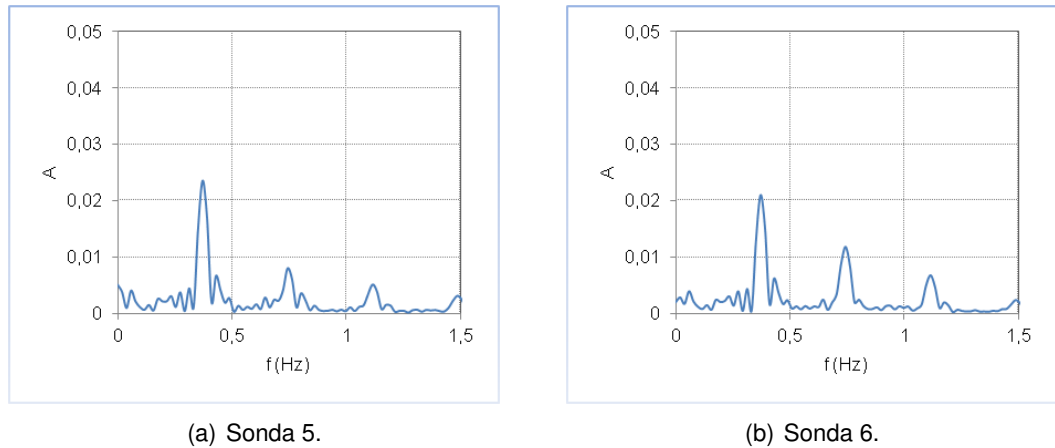


Figura 5.13: Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 5 e 6.

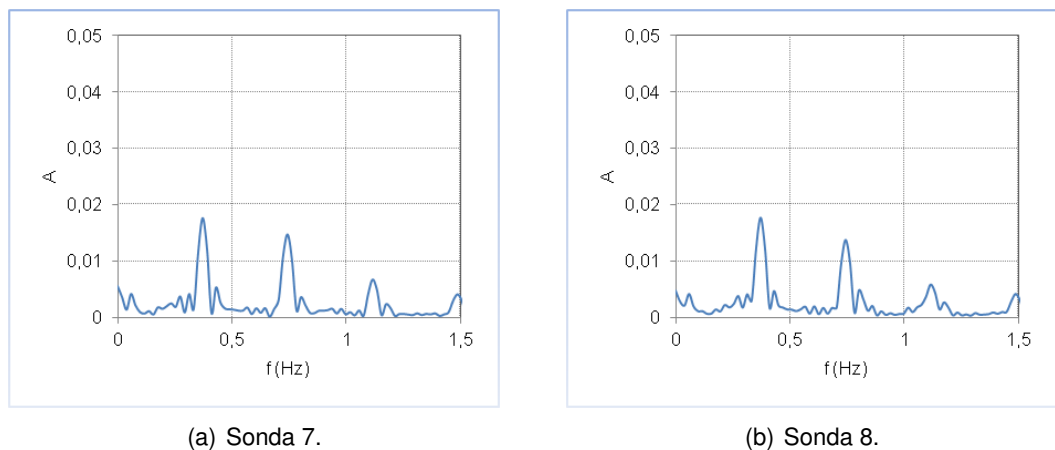
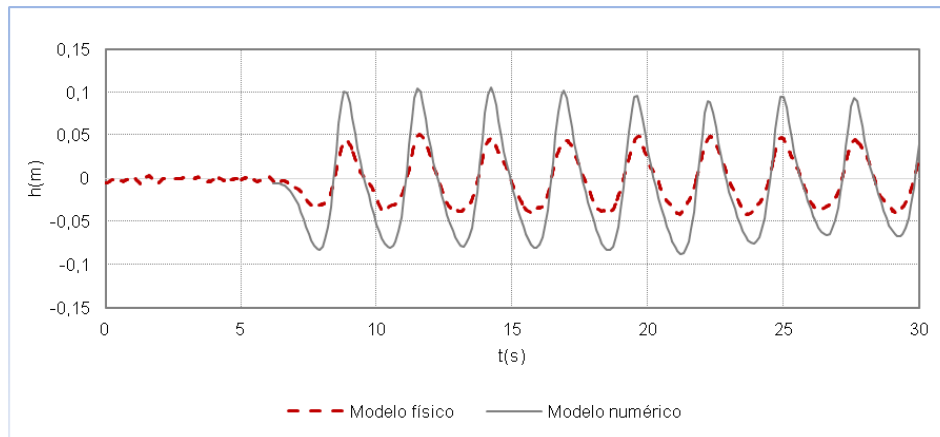


Figura 5.14: Espectro de frequência das sondas 'virtuais' 7 e 8.

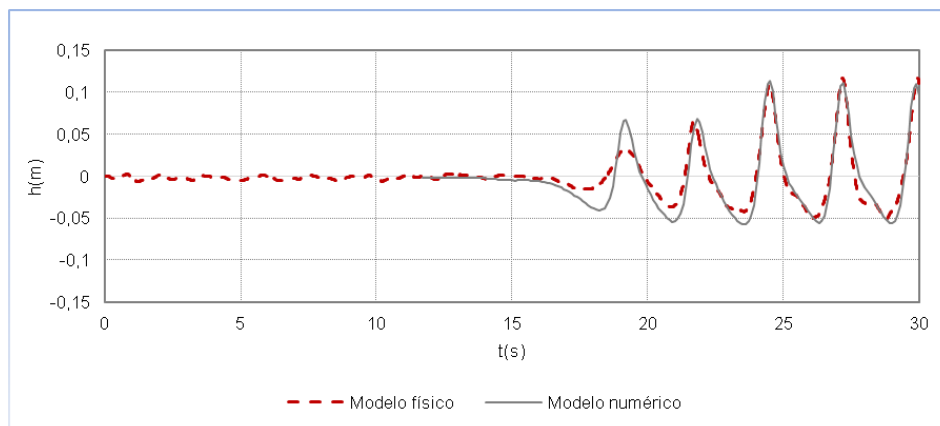
## 5.5 Análise e discussão dos resultados

Com estes resultados, é possível observar-se que a posição inicial do batedor e a redução de domínio aplicada ao modelo numérico, abreviou o tempo de chegada das ondas às sondas 'virtuais'. Porém, tal variação não foi considerada significativa visto que, no talude da praia, as séries temporais numéricas representam relativamente bem as séries temporais experimentais (Figura 5.15(b) e (c)). Considerando que o registo dos dados na série temporal das sondas tem início quando a primeira onda atinge a sonda, verifica-se na Figura 5.15 que no modelo numérico é necessário obter-se quase o dobro da amplitude na sonda 1 (situada na zona plana) para conseguir boa concordância entre as amplitudes registadas nas sondas 3 á 8 (situadas perto da estrutura). Como pode-se verificar, os resultados do modelo numérico e experimental convergem bastante nas sondas 3 e 8, ou seja, com a redução da distância entre a sonda e a estrutura. Deste modo, as ondas que atingem a estrutura no modelo numérico têm características

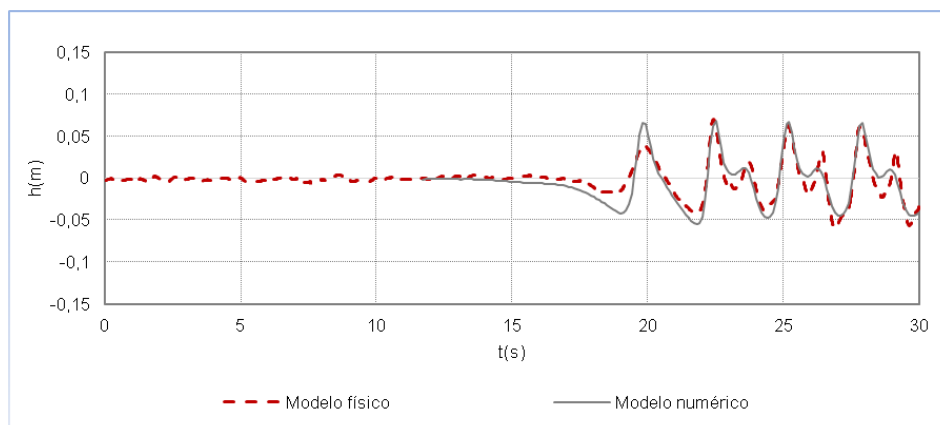
físicas e comportamentais semelhantes às ondas que interagem com a estrutura no modelo físico.



(a) Série temporal do modelo físico e numérico no ponto fixo 3,230 m.



(b) Série temporal do modelo físico e numérico no ponto fixo 13,635 m.

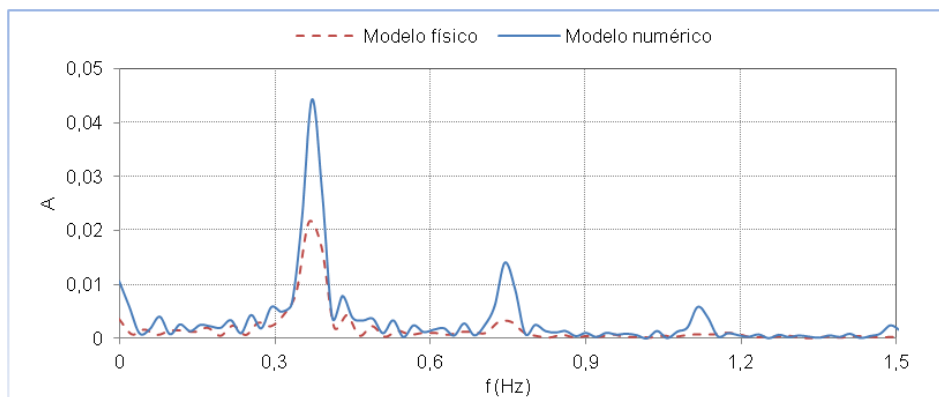


(c) Série temporal do modelo físico e numérico no ponto fixo 14,885 m.

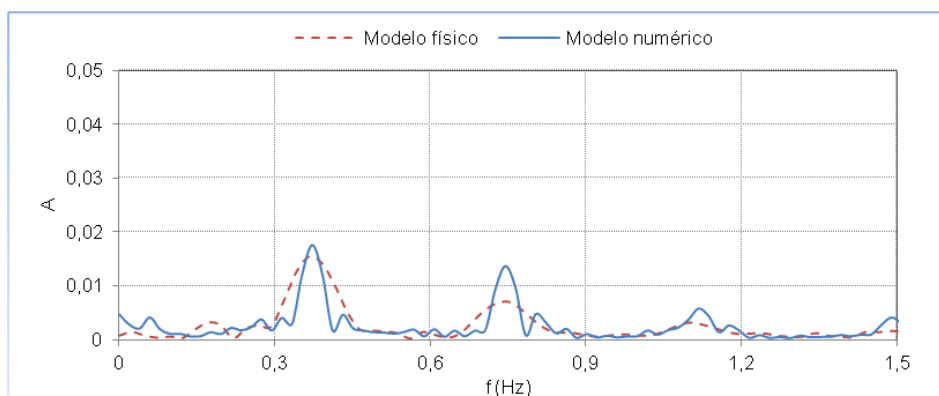
Figura 5.15: Elevação da superfície livre em ambos os modelos.

Nestas condições, o período médio é de 2,679 s e a altura média da onda é de 0,0948 m. Assim, os erros relativos entre  $T_2$  e 2,679 s é de 5,18% e entre  $H_1$  e 0,0945 m é de 0,023%, aproximando-se assim bastante das condições da agitação descritas no Capítulo 4. Estes valores justificam a diferença entre a amplitude de onda no modelo numérico e modelo físico, principalmente na sonda 1.

Quanto aos espectros de frequência, podemos observar na Figura 5.16 que o modelo numérico tem uma difusão numérica de energia, ou seja, as ondas geradas no modelo numérico perdem rapidamente energia durante a propagação. No modelo físico verifica-se uma perda bem menor. Este aspecto denota que há dissipação sucessiva da energia da onda durante a propagação o que mostra que o modelo numérico está em concordância com o que ocorre em zonas de águas pouco profundas (Capítulo 2). Observa-se ainda a ocorrência de vários 'picos' de frequência no espectro devido a não linearidade da onda durante a propagação.



(a) Espectros de frequência do modelo físico e numérico no ponto fixo 3,230 m.



(b) Espectros de frequência do modelo físico e numérico no ponto fixo 14,885 m.

Figura 5.16: Espectros de frequência em ambos os modelos.

Efectuando uma análise visual do modelo físico durante a sua experimentação e da respectiva simulação numérica (Figuras 5.17 a 5.21), é possível identificar e analisar os vários fenómenos relacionados com a dissipação, transmissão e reflexão da energia da onda.

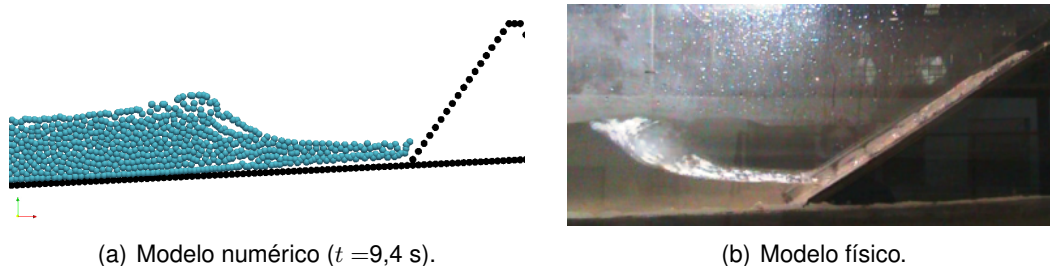


Figura 5.17: Propagação da onda.

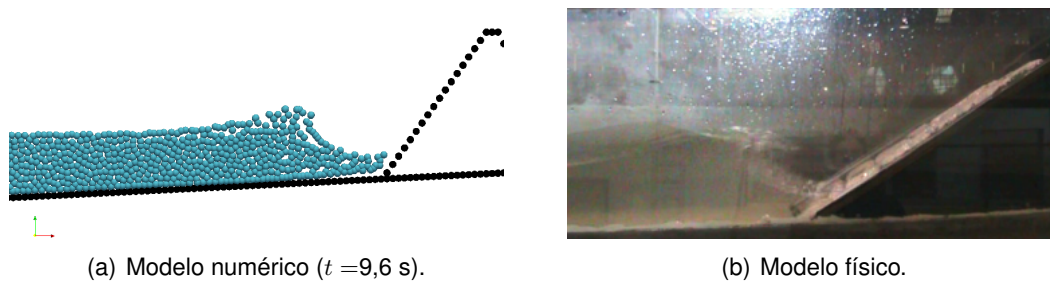


Figura 5.18: Deformação na crista da onda.

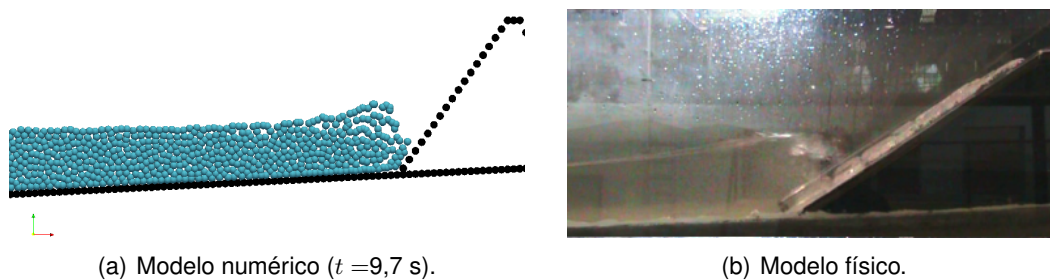


Figura 5.19: Rebentação da onda.

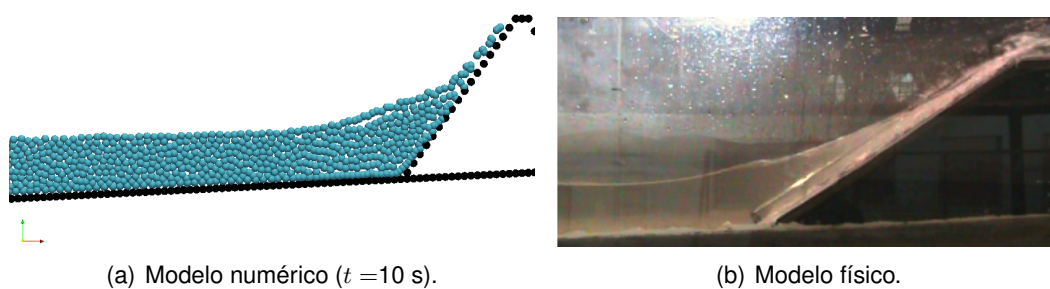


Figura 5.20: Espraiamento.

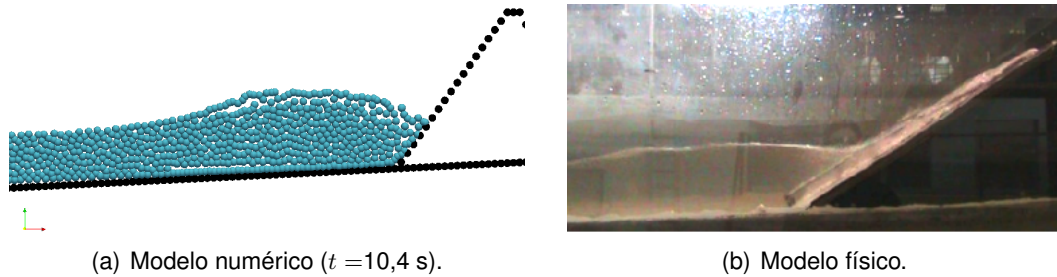


Figura 5.21: Refluxo.

Nas Figuras 5.17 e 5.18, é possível observar que, no modelo numérico, a instabilidade da onda tem início a uma distância ligeiramente superior, quando comparado com o modelo físico. Consequentemente, como pode ser constatado na Figuras 5.19(a), a perda de energia da onda, causada pela rebentação, tem início antes desta entrar em contacto com a estrutura, ao contrário da Figuras 5.19(b) onde a rebentação ocorre sobre a estrutura. Assim, como indicado na Figura 5.20(a), durante o espreadimento, a onda não tem energia suficiente para transpor a estrutura.

O valor do galgamento foi nulo no modelo número. Estes resultados, podem ser devido a: influência do batedor que o facto de não ter absorção activa de reflexão altera a onda incidente; erros numéricos inerente ao programa que causam grande perda de energia da onda durante a propagação, perdas estas muito superiores a registadas no modelo físico; calibração incorrecta de parâmetros do programa cujas influências ainda se desconhece. Considerando ainda o número de partículas utilizadas (32 858) e a duração da simulação, caso ocorresse a transposição de pelo menos uma partícula em cada espreadimento o galgamento seria inferior a  $9,03 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}/\text{m}$ , ou seja,

$$\frac{2,25 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m} \times 8 \text{ ondas}}{30 \text{ segundos}} = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}/\text{m}$$

Mas, para este método, verificou-se durante os testes de sensibilidade que um número pequeno de partículas não completam a transposição, ou seja, não passam para jusante da estrutura. Inicialmente as partículas ficam por pequenos instantes no topo da estrutura e posteriormente, devido a força de interacção entre as partículas, estas são atraídas novamente para montante da estrutura (Figura 5.22). Portanto, tendo em consideração a ordem de grandeza do modelo físico, para melhorar a precisão do modelo numérico seria necessário aumentar o número de partículas, isto é, reduzir o espaçamento ( $d_x$  e  $d_z$ ) e o passo de tempo  $dt$ . Em contrapartida, esta solução seria viável numa computação paralela isto porque, considerando a natureza do SPHysics, ter-se-ia um aumento proibitivo do tempo de simulação.

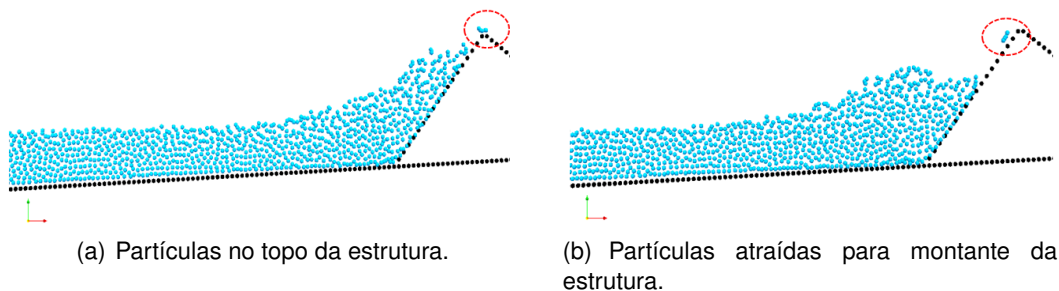


Figura 5.22: Comportamento das partículas num dos testes de sensibilidade.

## 5.6 Exemplo da versatilidade SPHysics

Como supracitado, o modelo numérico apresenta versatilidade e flexibilidade na modelação de vários cenários de estudo. A fim de demonstrar tal potencialidade no SPHysics, foi proposta uma solução de otimização da estrutura através da redução da sua altura.

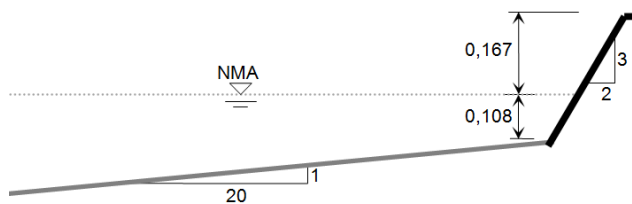


Figura 5.23: Pormenor do modelo numérico com  $R_c = 0,167$  m,  $NMA = 0,575$  m e  $d_s = 0,108$  m.

Inicialmente, como indicado na Figura 5.23, foi proposto um modelo 1, em talude e com uma cota de coroamento  $R_c = 0,167$  m, ou seja, uma estrutura com 0,275 m de altura. Nestas condições, após 30 s de simulação, verificou-se que ocorreu galgamento (Figura 5.24).

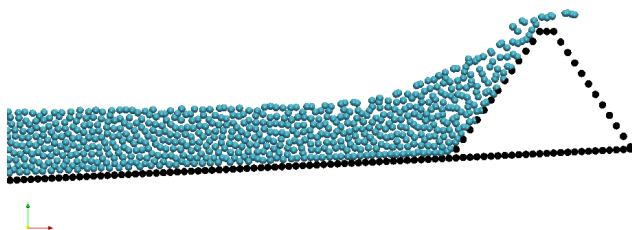


Figura 5.24: Galgamento da estrutura ( $t = 9,7$  s).

De seguida foi implementada, um modelo 2, com perfil côncavo – conforme pormenorizado na Figura 5.25 – e com altura de 0,275 m. Este perfil foi numericamente implementado através da equação da clotóide. Para tal foi necessário desenvolver no SPHysics<sub>gen\_2D.f</sub> alterações que permitissem obter uma superfície curva segundo os parâmetros da clotóide, indicados no Anexo E.

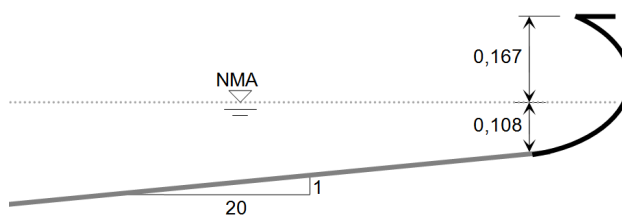


Figura 5.25: Pormenor do perfil côncavo 0,275 m de altura,  $NMA = 0,575$  m e  $d_s = 0,108$  m.

No modelo 2, não ocorreu galgamento. Na Figura 5.26, é possível observar-se que o modelo explicita facilmente e com realismo este tipo complexo de escoamento que inclui não só a rebentação da onda mas também a acção de deflexão da onda que ocorre no perfil côncavo da estrutura.

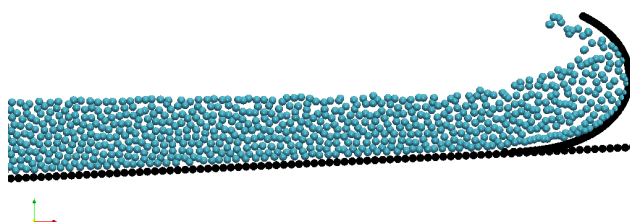


Figura 5.26: Deflexão da onda no perfil côncavo da estrutura ( $t = 9,7$  s).

Embora não haja dados experimentais disponíveis para validar estes resultados, esta análise pode tornar-se relevante quando se pretende investigar outras soluções de estruturas de protecção costeira longitudinais aderentes impermeáveis.





## Capítulo 6

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

No presente trabalho foi abordado o uso do programa SPHysics, baseado no método SPH, como mais uma ferramenta para estudar obras longitudinais aderentes, em particular no cálculo do galgamento em estruturas de protecção impermeável. Para o efeito, foi efectuada uma simulação numérica dos ensaios efectuados pelo LNEC, num modelo físico definido por um talude duma praia e uma estrutura de defesa. Nestas condições, o galgamento aparece como factor decisivo no dimensionamento de estruturas de protecção impermeável, uma vez que este condiciona a cota de coroamento destas estruturas que pode resultar no seu sobredimensionamento, o que acarreta custos de material e mão-de-obra avultados, ou no seu subdimensionado, que pode por em risco bens e vidas humanas.

### 6.1 Conclusões principais

As conclusões principais desta dissertação incidem sobre as potencialidades do SPHysics na representação das séries temporais, cálculo do caudal médio galgado por metro linear de estrutura bem como a sua capacidade de simular fenómenos complexos que ocorrem na interacção onda-estrutura. Em relação a estes aspectos, o modelo numérico, para os casos estudados, mostra algumas semelhanças com as séries temporais registadas nas sondas 3 à 8, embora se notem ligeiras diferenças no perfil das ondas nas sondas 1 e 2. No cálculo do caudal médio o resultado foi considerado satisfatório uma vez que a ordem de grandeza do galgamento no modelo físico encontra-se abaixo da precisão de cálculo do modelo numérico considerado. Assim sendo, este resultado traduz a sensibilidade do programa, revelando assim a capacidade do SPHysics de modelar fenómenos complexos, tais como a rebentação, o espraçamento, a interacção entre onda incidente e reflectida, e mais particularmente, o galgamento. Logo, para valores com ordem de grandeza igual ou inferior ao caudal de galgamento do modelo físico é necessário recorrer ao `parallelSPHysics` disponível em [33], onde é permitido a simulação de modelos com grandes quantidades de partícula sem que o tempo de cálculo se torne altamente proibitivo.

A natureza *Lagrangiana* do SPHysics proporciona algumas vantagens tais como:

- A partícula encontra-se concentrada numa região especificada pelo utilizador. Assim, durante os cálculos computacionais não há desperdício de tempo a calcular áreas vazias;
- Há facilidade na inclusão de fronteiras constituídas por objectos móveis e deformáveis, tais como paredes fixas ou batedor do tipo pistão, representado por partículas animadas;
- Não existem restrições impostas as formas geométricas do sistema ou o quanto ele pode evoluir à partir das condições iniciais, condições estas facilmente aplicáveis;

Contudo existem também algumas desvantagens. Das mais marcantes, salientam-se:

- Dificuldade na determinação de algumas condições de fronteira do problema uma vez que há risco de penetração de fluidos nos contornos considerados sólidos, principalmente quando estes se tratam de taludes (Figura 6.1). A solução principal deste tipo de problemas passa pela opção do passo de tempo automático ou ainda na redução do passo de tempo na integração numérica;

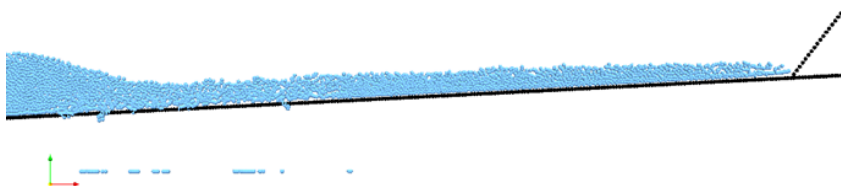


Figura 6.1: Penetração de fluidos nos contornos considerados sólidos.

- A simplicidade do processo de interpolação no SPH causa desarranjos das partículas. No gradiente de primeira ordem o SPH possibilita obter resultados razoáveis - apesar de alguns autores recomendarem sua correcção. Mas para derivadas de ordens superiores o problema pode-se agravar, levando a necessidade de recorrer a técnicas especiais de correcção [9];
- Em termos de tempo de cálculo, o método é considerado lento e muitas vezes proibitivo quando comparado com alguns métodos de malha fixa. O aumento do tempo de cálculo é influenciado pela dimensão reduzida do passo de tempo de integração numérica e pela quantidade de partículas necessárias a serem consideradas. Por exemplo, para os casos simulados neste trabalho, após algumas análises considerou-se que 30 s e  $dt = 10^{-4}$ s eram aceitáveis para efectuar a integração numérica e obter resultados admissíveis num domínio de 32858 partículas. Isto porque, utilizando uma máquina com processador Intel Core 2 Duo E8400 3.0GHz, o tempo de

cálculo foi de aproximadamente 30 horas para cada modelo. Assim sendo, a optimização do domínio de cálculo, tal como a redução efectuada neste trabalho é essencial, dado que este influencia em muito o tempo de simulação.

## 6.2 Desenvolvidos futuros

Apesar do programa SPHysics apresentar potencialidade e aplicabilidade em casos de estudo de engenharia costeira, a sua utilização com o objectivo de tornar-se numa ferramenta numérica para concepção, optimização e análise de estrutura marítimas, terá ainda de ser melhorada. No caso do batedor, é necessário implementar no programa a capacidade de geração com absorção activa/dinâmica das ondas reflectidas e assim evitar alteração do sinal incidente. Este procedimento irá permitir obter resultados mais fiáveis, uma vez que permitirá realizar simulações em tempo suficiente para análise, sem haver re-reflexão da onda no batedor. Para melhor percepção dos parâmetros implementados no programa, é ainda necessário efectuar testes de sensibilidade para identificar com alguma clareza a influência de certos parâmetros no modelo numérico, como por exemplo, o Riemann Solver implementado no SPHysics para normalizar as flutuações de pressão, resultantes das equações SPH, e assim manter um desvio padrão aceitável de 2% a 3% no máximo.



# Bibliografia

- [1] Airy, G. B.: *Tides and Waves*. Encyclopedia Metropolitana, V:241–396, 1845. Article 192.
- [2] Alvo, P. H. S.: *Aplicação do modelo numérico COBRAS-UC ao estudo da interacção de ondas com protecções marginais*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, Setembro 2008.
- [3] Brito, S. F.: *Estudo do Galgamento em Estruturas Marítimas*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, Novembro 2007.
- [4] Burchartch, H. F. e S. A. Hughes: *Coastal Engineering Manual, Part II*, capítulo 1, páginas II–1–1 a II–1–11. Coastal and Hydraulics Laboratory, 2001.
- [5] Burchartch, H. F. e S. A. Hughes: *Coastal Engineering Manual, Part VI*, capítulo 2, páginas VI–2–2 a VI–2–25. Coastal and Hydraulics Laboratory, 2001.
- [6] Capitão, R.: *Plano de Investigação Programada 2005-2008*. Projecto de investigação na área de risco e segurança.
- [7] Crespo, A. J. C.: *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*. Tese de Doutoramento, Universidade de Vigo, Galiza, Espanha, Junho 2008.
- [8] Dias, J. M. A.: *Estudo de Avaliação da Situação Ambiental e Proposta de Medidas de Salvaguarda para a Faixa Costeira Portuguesa (Geologia Costeira)*. e-books, 1993. Disponível na internet em <http://w3.ualg.pt/jdias/JAD/eb-Ambicost.html>.
- [9] Didier, E. e M. G. Neves: *Modelação da Interacção entre uma Onda e uma Estrutura de Protecção Costeira usando um Modelo Numérico SPH - Smoothed Particles Hydrodynamics*. Journal of Integrated Coastal Zone Management, páginas 435–455, Julho 2010.
- [10] Didier, E. e M. G. Neves: *Modelação de estruturas marítima usando um modelo numérico Smoothed Particles Hydrodynamics*. 4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Novembro 2010.

- [11] Gilat e Subramaniam: *Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB*, 2e. John Wiley and Sons, Inc., 2011.
- [12] Gómez-Gesteira, M., B.D. Rogers, R.A. Dalrymple, A.J.C. Crespo e M. Narayanaswamy: *User Guide for the SPHysics Code v2.0*. <http://www.sphysics.org>, 2010.
- [13] Gomes, Fernando V.: *Erosão Costeira e Ordenamento do Território na Costa da Caparica*. Relatório Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [14] Hughes, S. A.: *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific, 1993.
- [15] Kamphuis, W. J.: *Introduction to coastal engineering and management*. World Scientific, 2000.
- [16] Liu, G. R. e M. B. Liu: *Smoothed Particle Hydrodynamics - A Meshfree Particle Method*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 1st edição, 2003.
- [17] Monaghan, J. J.: *Smoothed Particles Hydrodynamics*. 1992.
- [18] Neves, L. P.: *Geossintéticos e Geossistemas em Engenharia Costeira*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, Junho 2003.
- [19] Neves, M. G., M. T. Reis e E. Didier: *Modelação Numérica da Interação Onda-Estrutura*. Relatório Técnico, Laboratório Nacional de Engenharia Civil-LNEC, 2006.
- [20] Pavel Novák, A. I. B. e C. Nalluri Moffat: *Hydraulic Structures*. Spon Press, 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE, 1st edição, 2001.
- [21] Pullen, T., N. W. H. Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schuttrumpf e J. W. van der Meer: *Eurotop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Janeiro 2007.
- [22] Reis, M. T. e M. G. Neves: *Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico baseado na Teoria da Onda em Condições de Água pouco Profunda*. Journal of Integrated Coastal Zone Management, páginas 397– 417, Agosto 2010.
- [23] Reis, M. T., M. G. Neves, K. Hu e T. Hedges: *Aplicação do Modelo Numérico AMAZON ao Cálculo do Galgamento de Estruturas Costeiras e Portuárias*. Relatório Técnico, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 2007.
- [24] Station, US Army Engineer Waterways Experiment: *Shore Protection Manual*, volume 2 de *Coastal Engineering Research Center*. US Government Printing Office, Washington, D.C, 4th edição, 1984.

- [25] Vacondio, R.: *Shallow Water and Navier-Stokes SPH-like numerical modelling of rapidly varying free-surface flows*. Tese de Doutorado, Università degli Studi di Parma Facoltà di Ingegneria, Parma, Itália, Janeiro 2010.
- [26] [www. adesadefaro.blogspot.com/2011/02/ilha-de-faro-sob-risco-iminente.html](http://www.adesadefaro.blogspot.com/2011/02/ilha-de-faro-sob-risco-iminente.html), 2011. Última consulta em Fevereiro.
- [27] [www. forum.netxplica.com](http://www.forum.netxplica.com), 2011. Última consulta em Fevereiro.
- [28] [www. meted.ucar.edu/marine/SWW/sectionmenu.htm](http://www.meted.ucar.edu/marine/SWW/sectionmenu.htm), 2011. Última consulta em Abril.
- [29] [www. adesadefaro.blogspot.com](http://www.adesadefaro.blogspot.com), 2011. Última consulta em Março.
- [30] [www. seth.pt/tabid/65/Default.aspx](http://www.seth.pt/tabid/65/Default.aspx), 2011. Última consulta em Março.
- [31] [www. ondas3.blogs.sapo.pt/2008/12/?page=2](http://www.ondas3.blogs.sapo.pt/2008/12/?page=2), 2011. Última consulta em Março.
- [32] [www. engenhariacivil.com/intervencoes-defesa-costeira](http://www.engenhariacivil.com/intervencoes-defesa-costeira), 2011. Última consulta em Março.
- [33] [www. sphysics.org](http://www.sphysics.org), 2011. Última consulta em Maio.
- [34] [www. paraview.org](http://www.paraview.org), 2011. Última consulta em Setembro.





## **Apêndice A**

### **Secção transversal do modelo físico.**

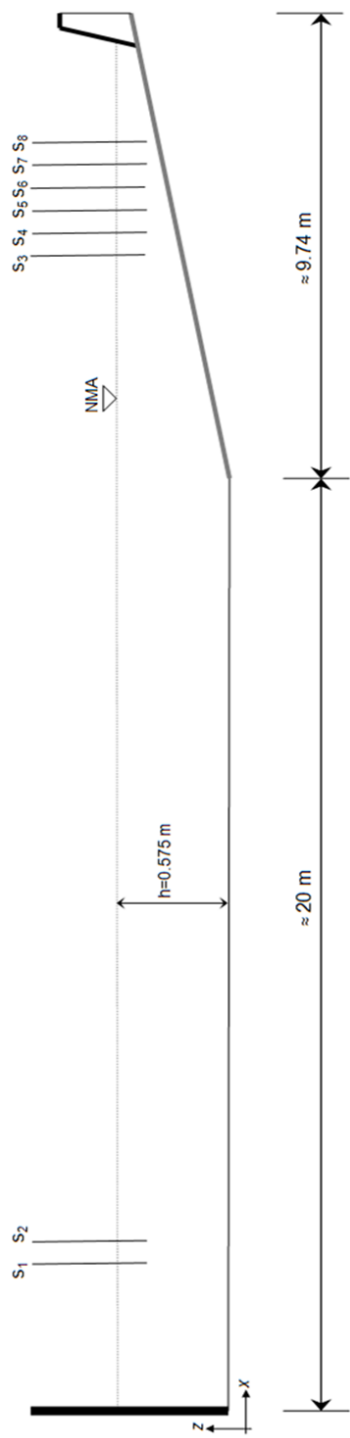


Figura A.1: Secção transversal do modelo físico.

## Apêndice B

# Ficheiro de dados do modelo numérico

```
0          Choose Starting options: 0=new, 1=restart,
          2=new with CheckPointg, 3=restart with CheckPointing
2          Kernel: 1=gaussian, 2=quadratic; 3=cubic; 5=Wendland
1          Time-stepping algorithm: 1=predictor-corrector, 2=verlet,
          3=symplectic, 4=Beeman
1          Density Filter: 0=none, 1=Shepard filter, 2=MLS
30         ndt_FilterPerform (if density filter is used) ?
0          Kernel correction 0=None, 1=Kernel correction,
          2=Gradient kernel Correction
3          Viscosity treatment: 1=artificial; 2=laminar; 3=laminar + SPS
1.0e-6     Viscosity value( if visc.treatment=1 it's alpha,
          if not kinem. visc approx 1.e-6)
0          Vorticity printing ? (1=yes)
1          Equation of State: 1=Tait's equation, 2=Ideal Gas, 3= Morris
0.575      Maximum Depth (h_SWL) to calculate B
20         Coefficient of speed of sound (recommended 10 - 40 ) ??
1          Boundary Conditions: 1=Repulsive Force; 2=Dalrymple
8.0e-4     Wall viscosity value for Repulsive Force BC
2          Geometry of the zone: 1=BOX, 2=BEACH, 3=COMPLEX GEOMETRY
1          Initial Fluid Particle Structure: 1= SC, 2= BCC
20.0,1.0   Box dimension LX, LZ?
0.015,0.015 Spacing dx, dz?
8.0        Length of Flat Domain
2.8624     Slope (deg) of the inclined plane ( beta ) ??
0,0,0      Periodic Lateral boundaries in X, Y, & Z-Directions ? (1=yes)
1          If wavemaker will be added, left pannel is not needed (1=yes)
1          Add obstacle (1=yes)
2          Choose obstacle: 1=rectangular, 2=trapezoid
17.34,0.485 Enter (x,z)-start of trapezoid
17.59,0.835 Enter (x,z)-start of trapezoid top
17.79,0.835 Enter (x,z)-finish of trapezoid top
17.80,0.5   Enter (x,z)-finish of trapezoid
0          Add another obstacle (1=yes)
```

```

2          Enter Paddle-Type: 1=Piston, 2=Piston-flap,
          3=Piston with prescribed motion
1.00       X_PaddleCentre
0.575      paddle_SWL
15.000     flap_length = distance of pivot point under bed
0.0,1.5    ZZMin, ZZmax of the wavemaker ??
0.0        Initial time of wavemaker = twavemaker ??
1          Number of frequencies ??
0.345      Wavemaker Stroke = 2*Amplitude ??
2.68       Period ??
0          Phase ??
0          twinitial ??
0          Add another wavemaker inside the beach (1=yes)
0          Add gate (1=yes)
0          Add Sliding Raichlen Wedge (1=yes)
0          Add Floating Body (1=yes)
1          Add water in the flat region ?? (1=yes)
0,8.00     Cube containing particles : XMin, Xmax ??
0.015,0.575 Cube containing particles : ZMin, Zmax ??
1          Add water in the inclined region ?? (1=yes)
8.01,17.412 Cube containing particles : XMin, Xmax ??
0.015,0.575 Cube containing particles : ZMin, Zmax ??
0          Add a solitary wave ?? (1=yes)
100.0,0.1  Input the tmax and out
0.0        initial time of recording
0.0,1.0,-1.0 detailed recording: out_dtreording, Start time, End Time
0.0001,1   input dt ??, variable dt ??
0.2        CFL number (0.1-0.5)
0.92       h=coefficient*sqrt(dx*dx+dy*dy+dz*dz): coefficient ???
0          Use of Riemann Solver: 0=None, 1=Conservative (Vila),
          2=NonConservative (Parshikov)
4          Which compiler is desired: 1=gfortran, 2=ifort,
          3=win_ifort, 4=Silverfrost FTN95
2          Precision of XYZ Variables: 1=Single, 2=Double

```

## Apêndice C

### Código POST-SPH.f

```
PROGRAM POST_SPH

CHARACTER*12 FILE

WRITE(*,*) "NUMBER INITIAL AND END OF PARTS:"
READ(*,*) IPMIN,IPMAX

WRITE(*,*) "XMIN, XMAX:"
READ(*,*) XMIN, XMAX

OPEN(2,FILE="SERIE_TEMP",STATUS='UNKNOWN')

DO I=IPMIN,IPMAX

C   DEFINE THE NAME OF THE FILE
      FILE(1:4)='PART'
      IF(I.LE.9) THEN
        WRITE(FILE(5:8),'(3H000,I1)') I
      ELSEIF(I.LE.99) THEN
        WRITE(FILE(5:8),'(2H00,I2)') I
      ELSEIF(I.LE.999) THEN
        WRITE(FILE(5:8),'(1H0,I3)') I
      ELSE
        WRITE(FILE(5:8),'(I4)') I
      ENDIF
      FILE(9:12)='.vtu'

C   OPEN PART_XXXX
      OPEN(1,ERR=100,FILE=FILE,STATUS='OLD')
```

```
NEL=164309
NP = 32858

DO II=1,NEL
  READ(1,*)
ENDDO

ZMAX = -10000.0
400  CONTINUE
    READ(1,*,ERR=300) X,Y,Z

    IF((X.GE.XMIN).AND.(X.LE.XMAX)) THEN
c      WRITE(*,*) X,Y,Z
      IF(Z.GT.ZMAX) ZMAX=Z

    ENDIF

    GOTO 400
300  CONTINUE
    WRITE(2,*) 0.1*I,ZMAX

    CLOSE(1)

ENDDO

GOTO 200
100  WRITE(*,*) 'ERROR in opening the file ',FILE
200  CONTINUE

CLOSE(2)

STOP
END
```

## Apêndice D

### Gráficos

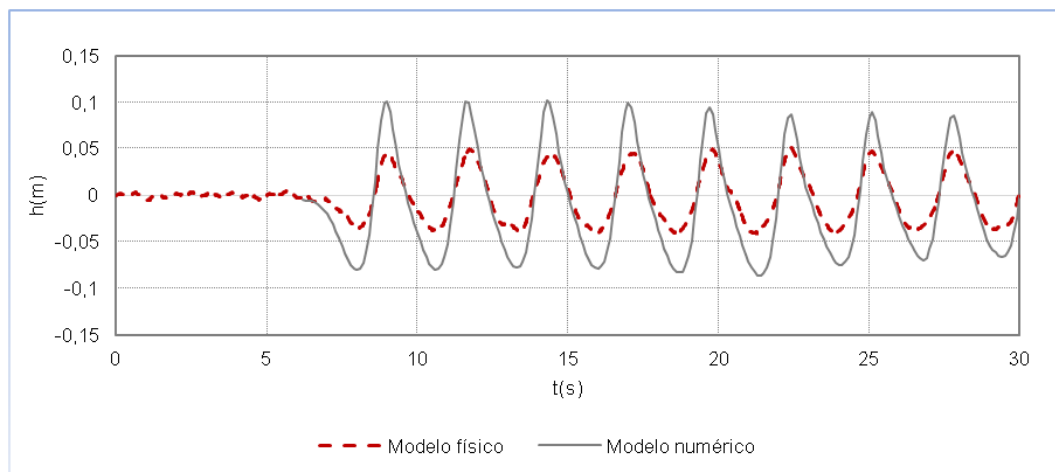


Figura D.1: Série temporal, sonda 2.

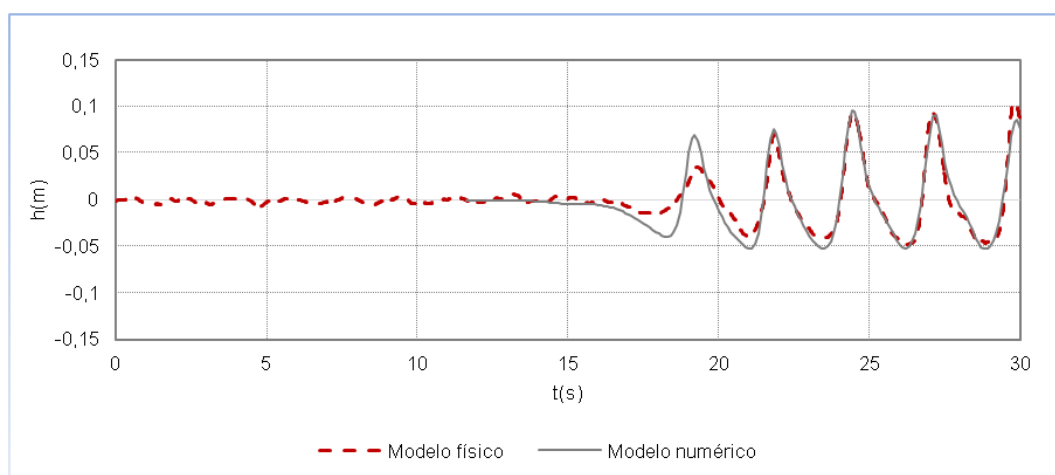


Figura D.2: Série temporal, sonda 4.

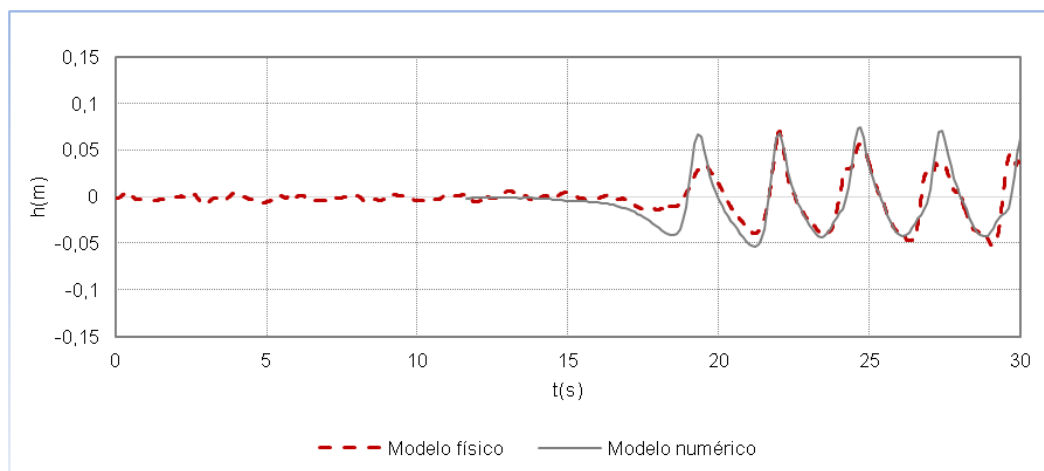


Figura D.3: Série temporal, sonda 5.

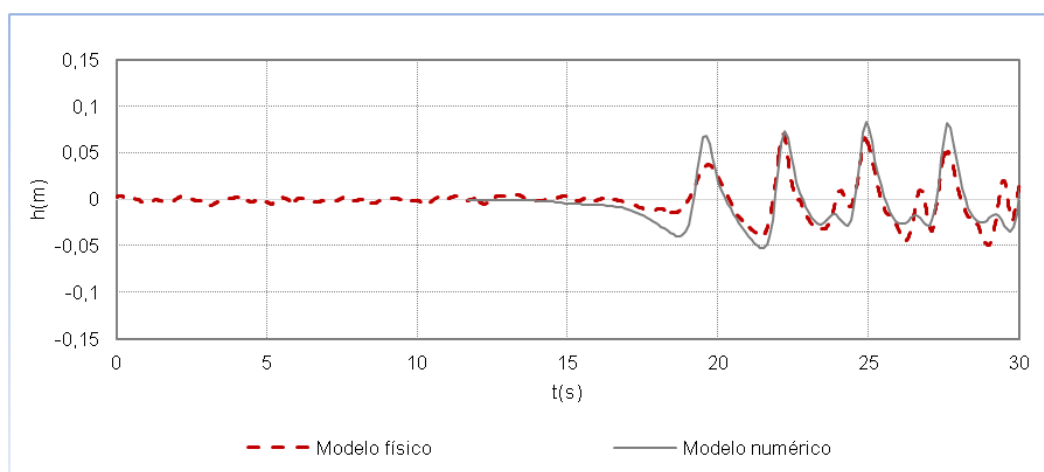


Figura D.4: Série temporal, sonda 6.

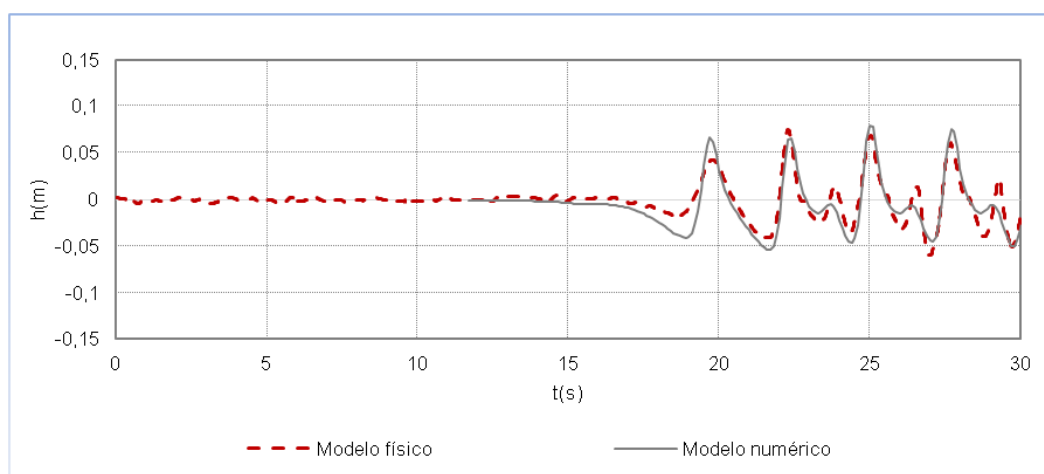


Figura D.5: Série temporal, sonda 7.



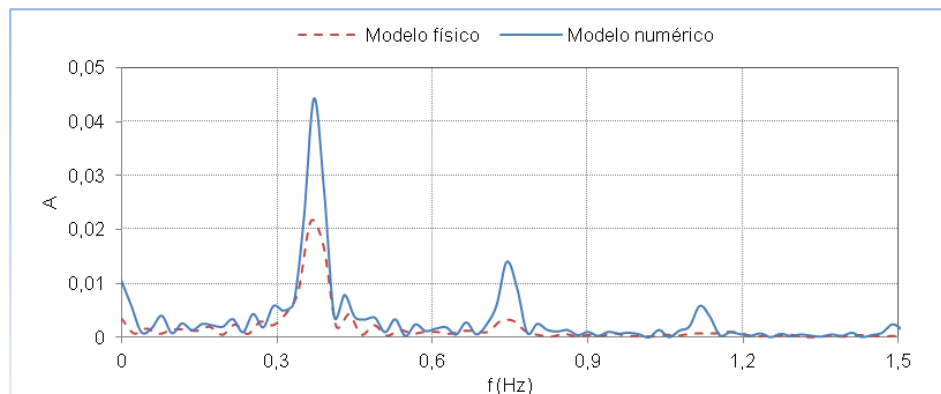


Figura D.6: Espectro de frequência, sonda 2.

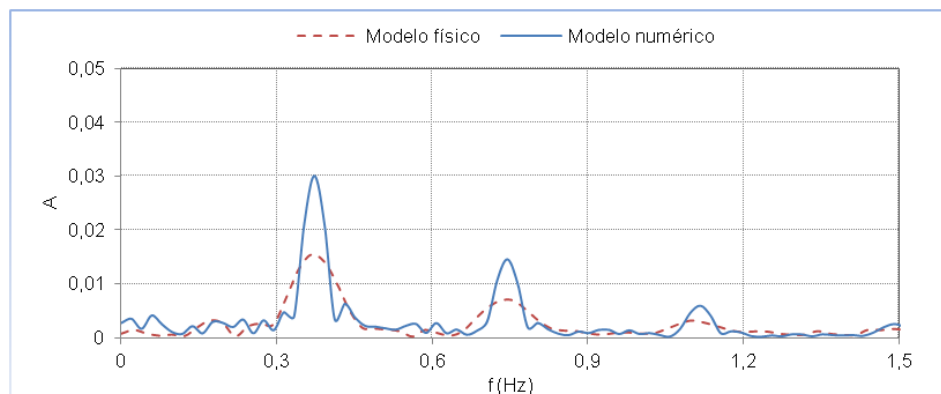


Figura D.7: Espectro de frequência, sonda 3.

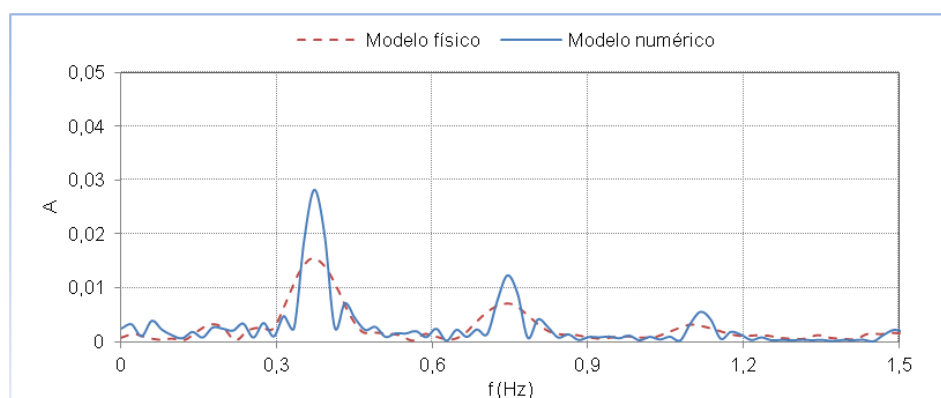


Figura D.8: Espectro de frequência, sonda 4.

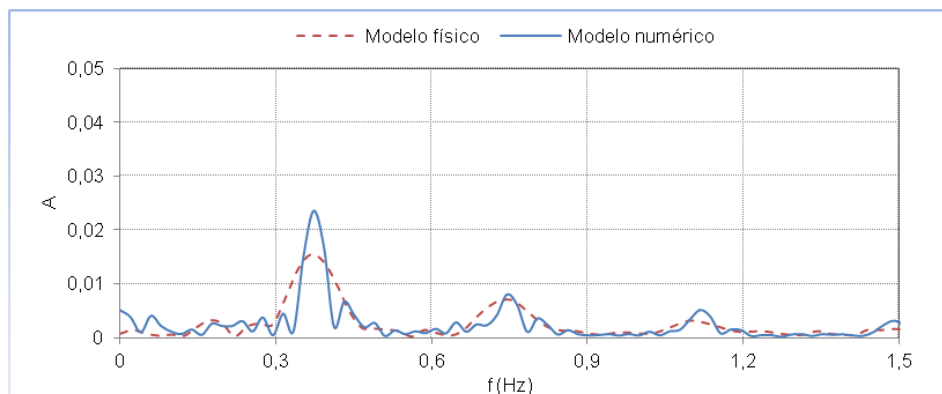


Figura D.9: Espectro de frequência, sonda 5.

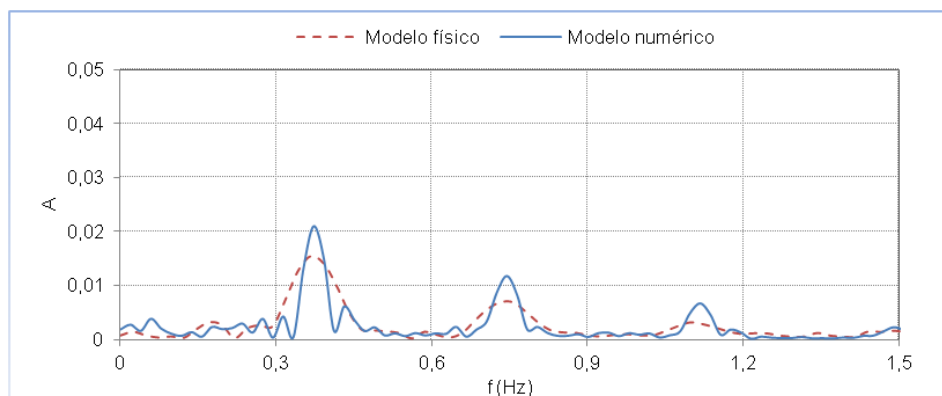


Figura D.10: Espectro de frequência, sonda 6.

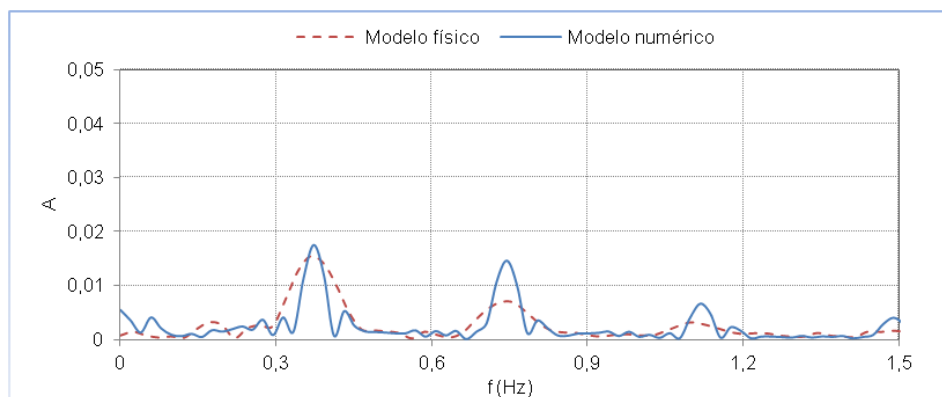


Figura D.11: Espectro de frequência, sonda 7.

## Apêndice E

# Implementação do perfil côncavo

```
2333
2334 C   Definição da clotóide
2335     A = 0.22
2336     LC = 0.0275
2337     R = A**2/LC
2338     alpha = 0.05
2339
2340     L = 0.0
2341
2342     do i = N_start,N_finish
2343         nn=nn+1
2344     L = L+8.0/(N_finish-N_start)
2345     t = L/(2*R)
2346
2347         x1 = x_trapezoid(n_trapezoid,1)
2348     &      + (A*sqrt(2*t)*(1-t**2/10))*cos(alfa)
2349     &      - (A*sqrt(2*t)*(t/3-t**3/58))*sin(alfa)
2350
2351         z1= z_trapezoid(n_trapezoid,1)
2352     &      + (A*sqrt(2*t)*(1-t**2/10))*sin(alfa)
2353     &      + (A*sqrt(2*t)*(t/3-t**3/58))*cos(alfa)
2354
2355
```